

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 11 月 29 日 (29.11.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/214236 A1

(51) 国际专利分类号:
H02P 23/00 (2016.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2017/091038

(22) 国际申请日: 2017 年 6 月 30 日 (30.06.2017)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201710371640.7 2017 年 5 月 24 日 (24.05.2017) CN

(71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/
CN]; 中国江苏省镇江市学府路 301 号,
Jiangsu 212013 (CN)。

(72) 发明人: 陈前 (CHEN, Qian); 中国江苏省镇江市
学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 范洵 (FAN,
Xun); 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu
212013 (CN)。 刘国海 (LIU, Guohai); 中国江苏
省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。
赵文祥 (ZHAO, Wenxiang); 中国江苏省镇江市
学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 吉敬华 (JI,
Jinghua); 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu
212013 (CN)。 徐高红 (XU, Gaohong); 中国江苏
省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 北京德崇智捷知识产权代理有限公司
(JW IP LAW FIRM); 中国北京市朝阳区酒仙桥路
14 号 A5 楼 7 层 701, Beijing 100015 (CN)。

(54) Title: METHOD FOR ADJUSTING HIGH EFFICIENCY REGION OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

(54) 发明名称: 一种调节永磁同步电机高效率区域的方法

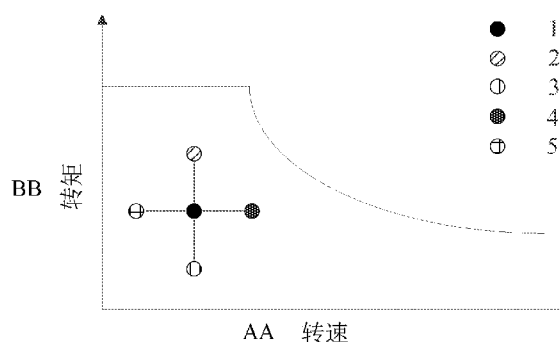


图 1

AA Rotational speed
BB Torque

(57) Abstract: A method for adjusting a high efficiency region of a permanent magnet synchronous motor, specifically comprising: revealing an internal relation between a high efficiency point and points around same, ascertaining an optimal proportion of copper loss, iron loss, and permanent magnet eddy current loss in the motor when the high efficiency point moves towards different directions, and further summarizing a method for adjusting the high efficiency region. The method is applicable to a permanent magnet motor in any form. The high efficiency region can be adjusted to a working point dense region of the motor under different operation working conditions according to design requirements. The high efficiency region and electric vehicle operation working conditions are effectively combined, such that energy consumption is reduced, and an electric vehicle endurance mileage is increased.

(57) 摘要: 一种调节永磁同步电机高效率区域的方法, 具体包括: 揭示高效率点与周围点的内在关系, 探明高效率点向不同方向运动时电机内铜耗、铁耗以及永磁体涡流损耗的最优配比, 进而总结出调节高效率区域的方法。该方法适用于任何形式的永磁电机, 可根据设计需求将高效率区域调节至不同运行工况下电机工作点密集区域, 有效的将高效率区域与电动汽车运行工况相结合, 减少了能源消耗, 提升电动汽车续航里程。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

一种调节永磁同步电机高效率区域的方法

技术领域

本发明涉及到永磁同步电机的设计，特别是永磁同步电机高效率区域的调节方法，属于电机制造的技术领域。

背景技术

现如今永磁电机已经得到了广泛的应用，从电动汽车到船舶推进的众多领域，永磁电机都扮演着十分重要的角色。这主要得益于永磁电机的几个显著优点，包括高转矩密度、高功率密度以及重量体积小等。永磁电机采用了高磁能积的永磁材料替代了传统的励磁绕组，不仅消除了励磁绕组带来的负面影响，而且简化了电机的机械结构，使电机运行可靠性提高，机械损耗也相应的减小。

虽然永磁电机拥有一系列的优点，但应用于电动汽车驱动系统等仍然存在许多不足。电动汽车的运行工况与永磁电机高效率区域的不一致造成能源的浪费、效率的降低。将永磁电机的高效率区域调节至电动汽车给定运行工况所对应的区域，使得电动汽车运行在高效率区域，从而节约能源。因此，研究调节永磁同步电机高效率区域的方法是非常具有价值的。

目前，对于高效率区域的调节，国内外都有比较深入的研究，如优化永磁体形状、优化轴向长度与绕组匝数的配比等方法。这些方法普遍的一个不足，就是都是通过降低损耗来扩大电机的高效率区域，实现高效率区域的略微调节，也就是并未实现高效率区域的大幅度调节、并未揭示高效率区域的调节方法。所以，如何大幅度调节高效率区域以及揭示调节的方法，是需要重点研究的方向。

发明内容

本发明的目的是，揭示了一种调节高效率区域的方法。在准确分析高效率区域调节方法的基础上，合理使用优化损耗的方法对铜耗、铁耗、永磁体涡流损耗进行匹配，将高效率区域调节移动至电动汽车给定运行工况所对应的区域，从而提高效率、节约能源。

本发明采用的技术方案是：调节永磁同步电机高效率区域的方法，包括以下步

骤:

步骤 1, 对目标电机的恒转矩区进行分析, 在恒转矩区选取最高效率点“1”, 根据恒转矩区点与点之间的关系, 在该点上、下、右、左四个方向各选取一个点“2”、“3”、“4”、“5”;

步骤 2, 分析恒转矩区最高效率点“1”与上方点“2”的转速、电流的关系 ($n_2=n_1$, $I_2=k_2I_1$), 得到两点之间的铜耗联系 ($P_{copp2} = k_2^2 P_{copp1}$), 进而推导出点“1”效率大于点“2”所要满足的条件 ($k_2 P_{copp1} \geq P_{iron1} + P_{PM1}$);

步骤 3, 分析恒转矩区最高效率点“1”与下方点“3”的转速、电流的关系 ($n_3=n_1$, $I_3=k_3I_1$), 得到两点之间的铜耗联系 ($P_{copp3} = k_3^2 P_{copp1}$), 进而推导出点“1”效率大于点“3”所要满足的条件 ($k_3 P_{copp1} < P_{iron1} + P_{PM1}$);

步骤 4, 分析恒转矩区最高效率点“1”与右边点“4”的电流、转矩、转速的关系 ($I_4=I_1$, $T_4=T_1$, $n_4=k_4n_1$), 得到两点之间的铜耗、磁滞铁耗、涡流铁耗、附加铁耗、永磁体涡流损耗联系 ($P_{copp4} = P_{copp1}$, $P_{h4} = k_4 P_{h1}$, $P_{c4} = k_4^2 P_{c1}$, $P_{E4} = k_4^{1.5} P_{E1}$, $P_{PM4} = k_4^2 P_{PM1}$), 进而推导出点“1”效率大于点“4”所要满足的条件 ($P_{copp1} < k_4(P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1})$);

步骤 5, 分析恒转矩区最高效率点“1”与左边点“5”的电流、转矩、转速的关系 ($I_5=I_1$, $T_5=T_1$, $n_5=k_5n_1$), 得到两点之间的铜耗、磁滞铁耗、涡流铁耗、附加铁耗、永磁体涡流损耗联系 ($P_{copp5} = P_{copp1}$, $P_{h5} = k_5 P_{h1}$, $P_{c5} = k_5^2 P_{c1}$, $P_{E5} = k_5^{1.5} P_{E1}$, $P_{PM5} = k_5^2 P_{PM1}$), 进而推导出点“1”效率大于点“5”所要满足的条件 ($P_{copp1} \geq k_5(P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1})$);

步骤 6, 总结高效率区域所满足的条件, 揭示调节高效率区域的方法;

步骤 7, 对于恒转矩区与恒功率区交界处区域进行研究, 分析该区域是否满足高效率区域调节条件;

步骤 8, 对于永磁电机的铜耗、铁耗、永磁体涡流损耗进行分析, 提出调节三种

损耗配比的方法；

步骤 9，采用方法验证高效率区域调节方法的正确性。

进一步，所述步骤 2 中，两点效率之间关系的计算过程为：

步骤 2.1，点“1”与点“2”的关系为： $n_2=n_1$ ， $I_2=k_2I_1$ ；

其中， n_2 表示点“2”的转速， n_1 表示点“1”的转速， I_2 表示点“2”的绕组电流幅值， I_1 表示点“1”的绕组电流幅值， k_2 表示一个大于 1 的系数。

步骤 2.2，由点“1”与点“2”转速、电流关系得到转矩、电磁功率和铜耗关系，具体如下：

$$\begin{aligned} T_2 &= k_2 T_1 \\ P_{e2} &= k_2 P_{e1} \\ P_{copp2} &= k_2^2 P_{copp1} \end{aligned}$$

其中， T_2 表示点“2”的转矩， T_1 表示点“1”的转矩， P_{e2} 表示点“2”的电磁功率， P_{e1} 表示点“1”的电磁功率， P_{copp2} 表示点“2”的铜耗， P_{copp1} 表示点“1”的铜耗。

步骤 2.3，忽略电机机械损耗和风摩损耗，写出点“1”与点“2”效率表达式，具体如下：

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{P_{e1}}{P_{e1} + P_{copp1} + P_{iron1} + P_{PM1}} \\ \eta_2 &= \frac{P_{e2}}{P_{e2} + P_{copp2} + P_{iron2} + P_{PM2}} \end{aligned}$$

其中， η_2 表示点“2”的效率， η_1 表示点“1”的效率， P_{iron2} 表示点“2”的铁耗， P_{iron1} 表示点“1”的铁耗， P_{PM2} 表示点“2”的永磁体涡流损耗， P_{PM1} 表示点“1”的永磁体涡流损耗。

步骤 2.4，假设点“1”的效率大于点“2”的效率，将两点之间的关系代入，得到假设成立所应满足的条件，具体如下：

$$\begin{aligned} y &= k_2(k_2 - 1)P_{copp1} > (k_2P_{iron1} - P_{iron2}) + (k_2P_{PM1} - P_{PM2}) = x \\ z &= (k_2 - 1)P_{iron1} + (k_2 - 1)P_{PM1} > x \end{aligned}$$

当点“1”与点“2”距离非常接近时， P_{iron2} 略大于 P_{iron1} ， P_{PM2} 略大于 P_{PM1} ，故 z 略

大于 x ，故 y 大于 z ，化简可得：

$$k_2 P_{copp1} \geq P_{iron1} + P_{PM1}$$

进一步，所述步骤 3 中，两点效率之间关系的计算过程为：

步骤 3.1，点“1”与点“3”的关系为： $n_3=n_1$ ， $I_3=k_3 I_1$ ；

其中， n_3 表示点“3”的转速， I_3 表示点“3”的绕组电流幅值， k_3 表示一个小于 1 的系数。

步骤 3.2，由点“1”与点“3”转速、电流关系得到转矩、电磁功率和铜耗关系，具体如下：

$$\begin{aligned} T_3 &= k_3 T_1 \\ P_{e3} &= k_3 P_{e1} \\ P_{copp3} &= k_3^2 P_{copp1} \end{aligned}$$

其中， T_3 表示点“3”的转矩， P_{e3} 表示点“3”的电磁功率， P_{copp3} 表示点“3”的铜耗。

步骤 3.3，忽略电机机械损耗和风摩损耗，写出点“1”与点“3”效率表达式，具体如下：

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{P_{e1}}{P_{e1} + P_{copp1} + P_{iron1} + P_{PM1}} \\ \eta_3 &= \frac{P_{e3}}{P_{e3} + P_{copp3} + P_{iron3} + P_{PM3}} \end{aligned}$$

其中， η_3 表示点“3”的效率， P_{iron3} 表示点“3”的铁耗， P_{PM3} 表示点“3”的永磁体涡流损耗。

步骤 3.4，假设点“1”的效率大于点“3”的效率，将两点之间的关系代入，得到假设成立所应满足的条件，具体如下：

$$\begin{aligned} y &= k_3(k_3 - 1)P_{copp1} > (k_3 P_{iron1} - P_{iron3}) + (k_3 P_{PM1} - P_{PM3}) = x \\ z &= (k_3 - 1)P_{iron1} + (k_3 - 1)P_{PM1} < x \end{aligned}$$

当点“1”与点“3”距离非常接近时， P_{iron3} 略小于 P_{iron1} ， P_{PM3} 略小于 P_{PM1} ，故 z 略小于 x ，故 y 大于 z ，化简可得：

$$k_3 P_{copp1} < P_{iron1} + P_{PM1}$$

进一步, 所述步骤 4 中, 两点效率之间关系的计算过程为:

步骤 4.1, 点 “1” 与点 “4” 的关系为: $I_4=I_1$, $T_4=T_1$, $n_4=k_4 n_1$;

其中, I_4 表示点 “4” 的绕组电流幅值, T_4 表示点 “4” 的转矩值, n_4 表示点 “4” 的转速, k_4 表示一个大于 1 的系数。

步骤 4.2, 由点 “1” 与点 “4” 电流、转矩、转速关系得到电磁功率、铜耗、铁耗中磁滞损耗、涡流损耗、附加损耗和永磁体涡流损耗关系, 具体如下:

$$\begin{aligned} P_{e4} &= k_4 P_{e1} \\ P_{copp4} &= P_{copp1} \\ P_{h4} &= k_4 P_{h1} \\ P_{c4} &= k_4^2 P_{c1} \\ P_{E4} &= k_4^{1.5} P_{E1} \\ P_{PM4} &= k_4^2 P_{PM1} \end{aligned}$$

其中, P_{e4} 表示点 “4” 的电磁功率, P_{copp4} 表示点 “4” 的铜耗, P_{h4} 表示点 “4” 的磁滞铁耗, P_{c4} 表示点 “4” 的涡流铁耗, P_{E4} 表示点 “4” 的附加铁耗, P_{PM4} 表示点 “4” 的永磁体涡流损耗, P_{h1} 表示点 “1” 的磁滞铁耗, P_{c1} 表示点 “1” 的涡流铁耗, P_{E1} 表示点 “1” 的附加铁耗。

步骤 4.3, 忽略电机机械损耗和风摩损耗, 写出点 “1” 与点 “4” 效率表达式, 具体如下:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{P_{e1}}{P_{e1} + P_{copp1} + P_{h1} + P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1}} \\ \eta_4 &= \frac{P_{e4}}{P_{e4} + P_{copp4} + P_{h4} + P_{c4} + P_{E4} + P_{PM4}} \end{aligned}$$

其中, η_4 表示点 “4” 的效率。

步骤 4.4, 假设点 “1” 的效率大于点 “4” 的效率, 将两点之间的关系代入, 得到假设成立所应满足的条件, 具体如下:

$$\begin{aligned} v &= (k_4 - 1)P_{copp1} < (k_4^2 - k_4)P_{c1} + (k_4^{1.5} - k_4)P_{E1} + (k_4^2 - k_4)P_{PM1} = u \\ w &= (k_4^2 - k_4)P_{c1} + (k_4^2 - k_4)P_{E1} + (k_4^2 - k_4)P_{PM1} > u \end{aligned}$$

当点“1”与点“4”距离非常接近时， $(k_4^2 - k_4)$ 略大于 $(k_4^{1.5} - k_4)$ ，故 w 略大于 u ，故 w 大于 v ，化简可得：

$$P_{copp1} < k_4(P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1})$$

进一步，所述步骤5中，两点效率之间关系的计算过程为：

步骤5.1，点“1”与点“5”的关系为： $I_5 = I_1$ ， $T_5 = T_1$ ， $n_5 = k_5 n_1$ ；

其中， I_5 表示点“5”的绕组电流幅值， T_5 表示点“5”的转矩值， n_5 表示点“5”的转速， k_5 表示一个小于1的系数。

步骤5.2，由点“1”与点“5”电流、转矩、转速关系得到电磁功率、铜耗、铁耗中磁滞损耗、涡流损耗、附加损耗和永磁体涡流损耗关系，具体如下：

$$\begin{aligned} P_{e5} &= k_5 P_{e1} \\ P_{copp5} &= P_{copp1} \\ P_{h5} &= k_5 P_{h1} \\ P_{c5} &= k_5^2 P_{c1} \\ P_{E5} &= k_5^{1.5} P_{E1} \\ P_{PM5} &= k_5^2 P_{PM1} \end{aligned}$$

其中， P_{e5} 表示点“5”的电磁功率， P_{copp5} 表示点“5”的铜耗， P_{h5} 表示点“5”的磁滞铁耗， P_{c5} 表示点“5”的涡流铁耗， P_{E5} 表示点“5”的附加铁耗， P_{PM5} 表示点“5”的永磁体涡流损耗。

步骤5.3，忽略电机机械损耗和风摩损耗，写出点“1”与点“5”效率表达式，具体如下：

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{P_{e1}}{P_{e1} + P_{copp1} + P_{h1} + P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1}} \\ \eta_5 &= \frac{P_{e5}}{P_{e5} + P_{copp5} + P_{h5} + P_{c5} + P_{E5} + P_{PM5}} \end{aligned}$$

其中， η_5 表示点“5”的效率。

步骤5.4，假设点“1”的效率大于点“5”的效率，将两点之间的关系代入，得到假设成立所应满足的条件，具体如下：

$$v = (k_5 - 1)P_{copp1} < (k_5^2 - k_5)P_{c1} + (k_5^{1.5} - k_5)P_{E1} + (k_5^2 - k_5)P_{PM1} = u$$

$$w = (k_5^2 - k_5)P_{c1} + (k_5^2 - k_5)P_{E1} + (k_5^2 - k_5)P_{PM1} < u$$

当点“1”与点“5”距离非常接近时， $(k_5^2 - k_5)P_{E1}$ 略小于 $(k_5^{1.5} - k_5)P_{E1}$ ，故 w 略小于 u ，故 w 大于 v ，化简可得：

$$P_{copp1} \geq k_5(P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1})$$

进一步，所述步骤6中的高效率区域所满足的条件具体如下：

$$P_{Vertical} = P_{copp} - (P_{iron} + P_{PM}) \approx 0$$

$$P_{Horizontal} = P_{copp} - (P_c + P_E + P_{PM}) \approx 0$$

其中， P_{copp} 表示铜耗， P_{iron} 表示铁耗， P_{PM} 表示永磁体涡流损耗， P_c 表示涡流铁耗， P_E 表示附加铁耗。当 $P_{vertical}>0$ 时，该点效率大于上方点的效率；当 $P_{vertical}<0$ 时，该点效率大于下方点的效率；当 $P_{Horizontal}>0$ 时，该点效率大于左边点的效率；当 $P_{Horizontal}<0$ 时，该点效率大于右边点的效率。若想将高效率区域调节至目标区域，则要将目标区域的点的 $P_{vertical}$ 和 $P_{Horizontal}$ 优化至接近0。

进一步，所述步骤7中的恒转矩区与恒功率区交界处区域，在该区域的下方，电流值较小，速度较低，因此电流角并未发生变化，仍然满足高效率区域调节的条件。

进一步，所述步骤8中的永磁电机的铜耗、铁耗、永磁体涡流损耗分别可以用表达式表示，具体如下：

$$P_{copp} = \frac{mI^2R}{2}$$

$$P_{iron} = P_h + P_c + P_E$$

$$P_{PM} = \frac{K^2 f^2 L_a B_m^2 L_m^2 V}{12\rho(L_a + L_m)}$$

其中， m 表示电机的相数， I 表示绕组电流幅值， R 表示每相绕组电阻值， P_h 表示磁滞铁耗， K 表示电动势常数， f 表示频率， L_a 表示电机的轴向长度， B_m 表示最大磁密， L_m 表示永磁体宽度， V 表示体积， ρ 表示电阻率。铜耗可以通过改变绕组电流幅值或者绕组电阻值进行调节，绕组电阻值在线径确定后主要由绕组长度决定；铁耗可以通过改变电枢磁场或者永磁磁场的强弱进行调节；永磁体涡流损耗可以通过转

子开孔、永磁体径向或轴向分段、改变永磁体极弧系数、改变定子槽开口大小、更换永磁体材料等方法进行调节。

进一步，所述步骤 8 中，提出利用绕组、永磁体和硅钢片参数变化来调节高效率区三种损耗配比的方法具体为：若要将高效率区域往上方或左边调节，可以采用的手段有：减小电流幅值增大绕组匝数、增加永磁体极弧系数、增加定子槽开口大小；若要将高效率区往下方或右边调节，可以采用的手段有：增加电流幅值减小绕组匝数、减小永磁体极弧系数、减小定子槽开口大小、永磁体径向分段或轴向分段。

进一步，所提出的效率调节方法，适用于任何形式的永磁电机。

本发明采用的有益效果是：

1. 本发明中对于效率 map 图中恒转矩区域以及恒转矩与恒功率区交界处下方区域的效率进行了分析，揭示了该区域点与点之间的效率大小所应满足的条件关系，使得效率 map 中效率的分布更易理解。

2. 本发明中的高效率区域调节方法，揭示了高效率区域满足的条件，对于调节高效率区域至指定区域提供了理论指导，节省了大量设计时间与精力。

3. 本发明中的高效率区域调节方法，适用于任何形式的永磁电机。从磁场方向来分可以包括径向、轴向和横向磁通永磁电机；从绕组结构上可以包括整数槽分布绕组永磁电机和分数槽集中绕组永磁电机；从永磁安装方式上来可以包括表贴式、表嵌式和内置式永磁电机。

4. 本发明中的高效率区域调节方法，针对的运动工况包括多种形式，例如 UDDS、NEDC 等。

5. 本发明中的高效率区域调节方法，能够结合运动工况进行高效率区调节，提高电机效率，减少能源消耗，提升电动汽车续航里程。

附图说明

图 1 为本发明中永磁电机恒转矩区域中点“1”与其上下右左“2”、“3”、“4”、“5”的关系图。

图 2 为本发明中永磁电机恒转矩区域中点“1”与其上方点“2”的关系图。

图 3 为本发明中永磁电机恒转矩区域中点“1”与其下方点“3”的关系图。

图 4 为本发明中永磁电机恒转矩区域中点“1”与其右边点“4”的关系图。

图 5 为本发明中永磁电机恒转矩区域中点“1”与其左边点“5”的关系图。

图 6 为本发明中 UDDS 工况图。

图 7 为本发明中根据 UDDS 工况、电机参数计算得到的相应的转矩转速分布图。

图 8 为本发明中三相表贴式永磁同步电机实施例。

图 9 为本发明中永磁电机永磁体极弧系数等于 1 时的电机效率 map。

图 10 为本发明中永磁电机永磁体极弧系数等于 1 时的电机效率 map 数据图。

图 11 为本发明中永磁电机永磁体极弧系数等于 0.3 时的电机效率 map。

图 12 为本发明中永磁电机永磁体极弧系数等于 0.3 时的电机效率 map 数据图。

具体实施方式

下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述。

下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，仅用于解释本发明，而不能理解为对本发明的限制。

如图 1 所示，为本发明中永磁电机恒转矩区域中点“1”与其上下右左“2”、“3”、“4”、“5”的关系图。

图 2 是本发明中恒转矩区域中点“1”与其上方点“2”的关系图，根据两点在恒转矩区的位置关系，列出两点之间的联系为： $n_2=n_1$ ， $I_2=k_2I_1$ ；根据转速、电流关系计算得到转矩、电磁功率、铜耗关系： $T_2=k_2T_1$ ， $P_{e2}=k_2P_{e1}$ ， $P_{copp2}=k_2^2P_{copp1}$ ；假设点“1”效率高于点“2”，计算出此假设成立的条件： $k_2P_{copp1} \geq P_{iron1} + P_{PM1}$ 。

图 3 是本发明中恒转矩区域中点“1”与其下方点“3”的关系图，根据两点在恒转矩区的位置关系，列出两点之间的联系为： $n_3=n_1$ ， $I_3=k_3I_1$ ；根据转速、电流关系计算得到转矩、电磁功率、铜耗关系： $T_3=k_3T_1$ ， $P_{e3}=k_3P_{e1}$ ， $P_{copp3}=k_3^2P_{copp1}$ ；假设点“1”效率高于点“3”，计算出此假设成立的条件： $k_3P_{copp1} < P_{iron1} + P_{PM1}$ 。

图 4 是本发明中恒转矩区域中点“1”与其右边点“4”的关系图，根据两点在

恒转矩区的位置关系，列出两点之间的联系为： $I_4=I_1$ ， $T_4=T_1$ ， $n_4=k_4n_1$ ；根据电流、转矩、转速关系计算得到电磁功率、损耗关系：

$P_{e4}=k_4P_{e1}$ ， $P_{copp4}=P_{copp1}$ ， $P_{h4}=k_4P_{h1}$ ， $P_{c4}=k_4^2P_{c1}$ ， $P_{E4}=k_4^{1.5}P_{E1}$ ， $P_{PM4}=k_4^2P_{PM1}$ ；假设点“1”效率高于点“4”，计算出此假设成立的条件： $P_{copp1} < k_4(P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1})$ 。

图 5 是本发明中恒转矩区域中点“1”与其左边点“5”的关系图，根据两点在恒转矩区的位置关系，列出两点之间的联系为： $I_5=I_1$ ， $T_5=T_1$ ， $n_5=k_5n_1$ ；根据电流、转矩、转速关系计算得到电磁功率、损耗关系： $P_{e5}=k_5P_{e1}$ ， $P_{copp5}=P_{copp1}$ ， $P_{h5}=k_5P_{h1}$ ， $P_{c5}=k_5^2P_{c1}$ ， $P_{E5}=k_5^{1.5}P_{E1}$ ， $P_{PM5}=k_5^2P_{PM1}$ ；假设点“1”效率高于点“5”，计算出此假设成立的条件： $P_{copp1} \geq k_5(P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1})$ 。

根据点“1”与四个方向的点“2”、“3”、“4”、“5”的关系，总结得到高效率区域所满足的条件： $P_{Vertical} = P_{copp} - (P_{iron} + P_{PM}) \approx 0$ ， $P_{Horizontal} = P_{copp} - (P_c + P_E + P_{PM}) \approx 0$ ， P_{copp} 表示铜耗， P_{iron} 表示铁耗， P_{PM} 表示永磁体涡流损耗， P_c 表示涡流铁耗， P_E 表示附加铁耗。当 $P_{vertical}>0$ 时，该点效率大于上方点的效率；当 $P_{vertical}<0$ 时，该点效率大于下方点的效率；当 $P_{Horizontal}>0$ 时，该点效率大于左边点的效率；当 $P_{Horizontal}<0$ 时，该点效率大于右边点的效率。最终，高效率区域调节方法得到揭示：若想将高效率区域调节至指定区域，则只要将指定区域的 $P_{vertical}$ 和 $P_{Horizontal}$ 优化至接近0即可。

对于恒转矩区与恒功率区交界处区域进行分析，在该区域的下方，电流值较小，速度较低，所以电流角并未发生变化，仍然满足高效率区域调节的条件。

图 6 为本发明中 UDDS 工况图，它表示 31 分钟、18 公里的城市路程，其中有 23 次停车、平均速度 32 公里/小时，最高速度 90 公里/小时。

图 7 为本发明中根据 UDDS 工况、电机参数计算得到的相应的转矩转速分布图。从图中可以看出该工况下电机主要工作于低转矩、中速区域，若电机效率 map 的高效率区域也处于此低转矩、中速区域，则能源将大大节省，否则则造成能源的浪费。

如图 8 所示，三相表贴式永磁同步电机包括外转子 1 和内定子 2；所述外转子 1 包括转子铁心 3 和 10 个永磁磁极 4；所述内定子包括 12 个定子槽 5 和嵌在其中的电枢绕组 6。

以三相表贴式永磁同步电机为例，对本发明的方法进行验证：

图 9 为本发明中永磁体极弧系数等于 1 时的电机效率 map。从图中可见，高效率区域位于转速范围 1000rpm~1500rpm、转矩范围 6.14Nm~9.45Nm 的区域，与图 7 的 UDDS 工况并不匹配，造成了能源的浪费。

将图 9 效率 map 中的数据提取出来重新标记于图 10 中，对于图 9 中高效率区域分布位置的原因进行分析。如图 10 所示，每个点包含 3 部分，分别代表该点的 $P_{vertical}$ 、 $P_{Horizontal}$ 和效率。以图中左上角第二行第二列的点（15.6/21.2/92.5%）为例，该点的效率（92.5%）大于上方的点（92.0%）、小于下方的点（92.8%），这是因为该点的 $P_{vertical}$ （15.6）大于 0；该点的效率（92.5%）大于左边的点（88.1%）、小于右边的点（93.8%），这是因为该点的 $P_{Horizontal}$ （21.2）大于 0。图 10 中恒转矩区大多数点均满足本发明中所述方法，极少数不满足的点是因为 $P_{vertical}$ 或 $P_{Horizontal}$ 接近 0 导致的误差，从而验证了本发明中方法的正确性。

根据高效率区调节方法，高效率区域现在处于高转矩区域是因为此区域的点满足 $P_{vertical}$ 和 $P_{Horizontal}$ 接近 0，而低转矩区域的 $P_{vertical}$ 小于 0，所以低转矩区域的效率小于上方高转矩区域的效率。由此可见，若想将高效率区域移动至低转矩区，则要降低铁耗和永磁体涡流损耗或者提高铜耗。

如图 11 所示为将永磁体极弧系数优化为 0.3 得到的效率 map。极弧系数降低后，电机的永磁磁场减弱导致铁耗、永磁体涡流损耗大大降低，而为了保持转矩峰值不变，电流值加大，导致铜耗上升。由图中可见，高效率区移动至转速范围 1350rpm~3500rpm、转矩范围 2~4.6Nm，高效率区从高转矩区移动至低转矩区。

将图 11 效率 map 的数据提取出重新标记于图 12。由图可见，每个点由三部分组成，分别代表该点的 $P_{vertical}$ 、 $P_{Horizontal}$ 和效率。可以看出，恒转矩区的每个点均符合所述高效率调节方法。

综上，本发明公开了永磁同步电机高效率调节的方法，通过在效率 map 恒转矩区域建立点与点之间的联系，推导得到高效率区域所要满足的条件，从而通过优化损耗进行高效率区域的调节。在基于电动汽车给定工况的永磁同步电机的情况下，运用调节方法对于电机高效率区域进行调节，使之与给定工况相匹配，从而提高效率、节约能源。

在本说明书的描述中，参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示意性实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中，对上述术语的示意性表述不一定指的是相同的实施例或示例。而且，描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任何的一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。

尽管已经示出和描述了本发明的实施例，本领域的普通技术人员可以理解：在不脱离本发明的方法和宗旨的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型，本发明的范围由权利要求及其等同物限定。

权 利 要 求 书

1、一种调节永磁同步电机高效率区域的方法，其特征在于，包括以下步骤：

下列符号定义如下： n_i 为表示点“ i ”的转速， I_i 表示点“ i ”的绕组电流幅值， $P_{copp\ i}$ 表示点“ i ”的铜耗， $P_{iron\ i}$ 表示点“ i ”的铁耗， $P_{PM\ i}$ 表示点“ i ”的永磁体涡流损耗， P_{hi} 表示点“ i ”的磁滞铁耗， $P_{c\ i}$ 表示点“ i ”的涡流铁耗， $P_{E\ i}$ 表示点“ i ”的附加铁耗， T_i 表示点“ i ”的转矩值， $P_{e\ i}$ 表示点“ i ”的电磁功率； k_i 表示系数，当 i 为 2 或 5 时大于 1，当 i 为 3 或 4 时小于 1；

步骤 1，对目标电机的恒转矩区进行分析，在恒转矩区设定点“1”为最高效率点，并在该点上、下、右、左四个方向各选取一个点“2”、“3”、“4”、“5”，进而构建高效率点与其它点之间的关系；

步骤 2，分析恒转矩区最高效率点“1”与上方点“2”的转速、电流的关系： $n_2=n_1$ ， $I_2=k_2I_1$ ，得到两点之间的铜耗联系： $P_{copp2}=k_2^2P_{copp1}$ ，进而推导出点“1”效率大于点“2”所要满足的条件 $k_2P_{copp1} \geq P_{iron1} + P_{PM1}$ ；

步骤 3，分析恒转矩区最高效率点“1”与下方点“3”的转速、电流的关系： $n_3=n_1$ ， $I_3=k_3I_1$ ，得到两点之间的铜耗联系： $P_{copp3}=k_3^2P_{copp1}$ ，进而推导出点“1”效率大于点“3”所要满足的条件： $k_3P_{copp1} < P_{iron1} + P_{PM1}$ ；

步骤 4，分析恒转矩区最高效率点“1”与右边点“4”的电流、转矩、转速的关系： $I_4=I_1$ ， $T_4=T_1$ ， $n_4=k_4n_1$ ，得到两点之间的铜耗、磁滞铁耗、涡流铁耗、附加铁耗、永磁体涡流损耗联系： $P_{copp4}=P_{copp1}$ ， $P_{h4}=k_4P_{h1}$ ， $P_{c4}=k_4^2P_{c1}$ ， $P_{E4}=k_4^{1.5}P_{E1}$ ， $P_{PM4}=k_4^2P_{PM1}$ ，进而推导出点“1”效率大于点“4”所要满足的条件： $P_{copp1} < k_4(P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1})$ ；

步骤 5，分析恒转矩区最高效率点“1”与左边点“5”的电流、转矩、转速的关系： $I_5=I_1$ ， $T_5=T_1$ ， $n_5=k_5n_1$ ，得到两点之间的铜耗、磁滞铁耗、涡流铁耗、附加铁耗、永磁体涡流损耗联系： $P_{copp5}=P_{copp1}$ ， $P_{h5}=k_5P_{h1}$ ， $P_{c5}=k_5^2P_{c1}$ ， $P_{E5}=k_5^{1.5}P_{E1}$ ， $P_{PM5}=k_5^2P_{PM1}$ ，进而推导出点“1”效率大于点“5”所要满足的条件： $P_{copp1} \geq k_5(P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1})$ ；

步骤 6，结合高效率区域所满足的条件，找出水平和垂直方向调节高效率点；

步骤 7, 对于恒转矩区与恒功率区交界处区域进行分析, 判断该区域是否满足高效率区域调节条件;

步骤 8, 对于永磁电机的铜耗、铁耗、永磁体涡流损耗进行分析, 提出利用绕组、永磁体和硅钢片参数变化来调节高效率区三种损耗配比的方法;

步骤 9, 结合运行工况验证高效率区域调节方法的正确性。

2、根据权利要求 1 所述的一种调节永磁同步电机高效率区域的方法, 其特征在于: 所述步骤 2 的具体过程为:

步骤 2.1, 建立点“1”与点“2”的关系为: $n_2=n_1$, $I_2=k_2I_1$;

其中, n_2 表示点“2”的转速, n_1 表示点“1”的转速, I_2 表示点“2”的绕组电流幅值, I_1 表示点“1”的绕组电流幅值, k_2 表示一个大于 1 的系数;

步骤 2.2, 由点“1”与点“2”转速、电流关系得到转矩、电磁功率和铜耗关系, 具体如下:

$$\begin{aligned} T_2 &= k_2 T_1 \\ P_{e2} &= k_2 P_{e1} \\ P_{copp2} &= k_2^2 P_{copp1} \end{aligned}$$

其中, T_2 表示点“2”的转矩, T_1 表示点“1”的转矩, P_{e2} 表示点“2”的电磁功率, P_{e1} 表示点“1”的电磁功率, P_{copp2} 表示点“2”的铜耗, P_{copp1} 表示点“1”的铜耗;

步骤 2.3, 忽略电机机械损耗和风摩损耗, 写出点“1”与点“2”效率表达式, 具体如下:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{P_{e1}}{P_{e1} + P_{copp1} + P_{iron1} + P_{PM1}} \\ \eta_2 &= \frac{P_{e2}}{P_{e2} + P_{copp2} + P_{iron2} + P_{PM2}} \end{aligned}$$

其中, η_2 表示点“2”的效率, η_1 表示点“1”的效率, P_{iron2} 表示点“2”的铁耗, P_{iron1} 表示点“1”的铁耗, P_{PM2} 表示点“2”的永磁体涡流损耗, P_{PM1} 表示点“1”的永磁体涡流损耗;

步骤 2.4, 假设点“1”的效率大于点“2”的效率, 将两点之间的关系代入, 得到假设成立所应满足的条件, 具体如下:

$$y = k_2(k_2 - 1)P_{copp1} > (k_2P_{iron1} - P_{iron2}) + (k_2P_{PM1} - P_{PM2}) = x$$

$$z = (k_2 - 1)P_{iron1} + (k_2 - 1)P_{PM1} > x$$

当点“1”与点“2”距离非常接近时， P_{iron2} 略大于 P_{iron1} ， P_{PM2} 略大于 P_{PM1} ，故 z 略大于 x ，故 y 大于 z ，化简可得：

$$k_2P_{copp1} \geq P_{iron1} + P_{PM1}。$$

3、根据权利要求1所述的一种调节永磁同步电机高效率区域的方法，其特征在于：所述步骤3的具体过程为：

步骤3.1，建立点“1”与点“3”的关系为： $n_3=n_1$ ， $I_3=k_3I_1$ ；

其中， n_3 表示点“3”的转速， I_3 表示点“3”的绕组电流幅值， k_3 表示一个小于1的系数；

步骤3.2，由点“1”与点“3”转速、电流关系得到转矩、电磁功率和铜耗关系，具体如下：

$$T_3 = k_3T_1$$

$$P_{e3} = k_3P_{e1}$$

$$P_{copp3} = k_3^2P_{copp1}$$

其中， T_3 表示点“3”的转矩， P_{e3} 表示点“3”的电磁功率， P_{copp3} 表示点“3”的铜耗；

步骤3.3，忽略电机机械损耗和风摩损耗，写出点“1”与点“3”效率表达式，具体如下：

$$\eta_1 = \frac{P_{e1}}{P_{e1} + P_{copp1} + P_{iron1} + P_{PM1}}$$

$$\eta_3 = \frac{P_{e3}}{P_{e3} + P_{copp3} + P_{iron3} + P_{PM3}}$$

其中， η_3 表示点“3”的效率， P_{iron3} 表示点“3”的铁耗， P_{PM3} 表示点“3”的永磁体涡流损耗；

步骤3.4，假设点“1”的效率大于点“3”的效率，将两点之间的关系代入，得到假设成立所应满足的条件，具体如下：

$$y = k_3(k_3 - 1)P_{copp1} > (k_3P_{iron1} - P_{iron3}) + (k_3P_{PM1} - P_{PM3}) = x$$

$$z = (k_3 - 1)P_{iron1} + (k_3 - 1)P_{PM1} < x$$

当点“1”与点“3”距离非常接近时， P_{iron3} 略小于 P_{iron1} ， P_{PM3} 略小于 P_{PM1} ，故 z 略小于 x ，故 y 大于 z ，化简可得：

$$k_3P_{copp1} < P_{iron1} + P_{PM1}。$$

4、根据权利要求1所述的一种调节永磁同步电机高效率区域的方法，其特征在于：所述步骤4的具体过程为：

步骤4.1，建立点“1”与点“4”的关系为： $I_4=I_1$ ， $T_4=T_1$ ， $n_4=k_4n_1$ ；

其中， I_4 表示点“4”的绕组电流幅值， T_4 表示点“4”的转矩值， n_4 表示点“4”的转速， k_4 表示一个大于1的系数；

步骤4.2，由点“1”与点“4”电流、转矩、转速关系得到电磁功率、铜耗、铁耗中磁滞损耗、涡流损耗、附加损耗和永磁体涡流损耗关系，具体如下：

$$P_{e4} = k_4P_{e1}$$

$$P_{copp4} = P_{copp1}$$

$$P_{h4} = k_4P_{h1}$$

$$P_{c4} = k_4^2P_{c1}$$

$$P_{E4} = k_4^{1.5}P_{E1}$$

$$P_{PM4} = k_4^2P_{PM1}$$

其中， P_{e4} 表示点“4”的电磁功率， P_{copp4} 表示点“4”的铜耗， P_{h4} 表示点“4”的磁滞铁耗， P_{c4} 表示点“4”的涡流铁耗， P_{E4} 表示点“4”的附加铁耗， P_{PM4} 表示点“4”的永磁体涡流损耗， P_{h1} 表示点“1”的磁滞铁耗， P_{c1} 表示点“1”的涡流铁耗， P_{E1} 表示点“1”的附加铁耗；

步骤4.3，忽略电机机械损耗和风摩损耗，写出点“1”与点“4”效率表达式，具体如下：

$$\eta_1 = \frac{P_{e1}}{P_{e1} + P_{copp1} + P_{h1} + P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1}}$$

$$\eta_4 = \frac{P_{e4}}{P_{e4} + P_{copp4} + P_{h4} + P_{c4} + P_{E4} + P_{PM4}}$$

其中， η_4 表示点“4”的效率；

步骤 4.4, 假设点 “1” 的效率大于点 “4” 的效率, 将两点之间的关系代入, 得到假设成立所应满足的条件, 具体如下:

$$\begin{aligned} v &= (k_4 - 1)P_{copp1} < (k_4^2 - k_4)P_{c1} + (k_4^{1.5} - k_4)P_{E1} + (k_4^2 - k_4)P_{PM1} = u \\ w &= (k_4^2 - k_4)P_{c1} + (k_4^2 - k_4)P_{E1} + (k_4^2 - k_4)P_{PM1} > u \end{aligned}$$

当点 “1” 与点 “4” 距离非常接近时, $(k_4^2 - k_4)$ 略大于 $(k_4^{1.5} - k_4)$, 故 w 略大于 u , 故 w 大于 v , 化简可得:

$$P_{copp1} < k_4(P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1})。$$

5、根据权利要求 1 所述的一种调节永磁同步电机高效率区域的方法, 其特征在于: 所述步骤 5 的具体过程为:

步骤 5.1, 建立点 “1” 与点 “5” 的关系为: $I_5=I_1$, $T_5=T_1$, $n_5=k_5n_1$;

其中, I_5 表示点 “5” 的绕组电流幅值, T_5 表示点 “5” 的转矩值, n_5 表示点 “5” 的转速, k_5 表示一个小于 1 的系数;

步骤 5.2, 由点 “1” 与点 “5” 电流、转矩、转速关系得到电磁功率、铜耗、铁耗中磁滞损耗、涡流损耗、附加损耗和永磁体涡流损耗关系, 具体如下:

$$\begin{aligned} P_{e5} &= k_5 P_{e1} \\ P_{copp5} &= P_{copp1} \\ P_{h5} &= k_5 P_{h1} \\ P_{c5} &= k_5^2 P_{c1} \\ P_{E5} &= k_5^{1.5} P_{E1} \\ P_{PM5} &= k_5^2 P_{PM1} \end{aligned}$$

其中, P_{e5} 表示点 “5” 的电磁功率, P_{copp5} 表示点 “5” 的铜耗, P_{h5} 表示点 “5” 的磁滞铁耗, P_{c5} 表示点 “5” 的涡流铁耗, P_{E5} 表示点 “5” 的附加铁耗, P_{PM5} 表示点 “5” 的永磁体涡流损耗;

步骤 5.3, 忽略电机机械损耗和风摩损耗, 写出点 “1” 与点 “5” 效率表达式, 具体如下:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{P_{e1}}{P_{e1} + P_{copp1} + P_{h1} + P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1}} \\ \eta_5 &= \frac{P_{e5}}{P_{e5} + P_{copp5} + P_{h5} + P_{c5} + P_{E5} + P_{PM5}} \end{aligned}$$

其中, η_5 表示点“5”的效率;

步骤 5.4, 假设点“1”的效率大于点“5”的效率, 将两点之间的关系代入, 得到假设成立所应满足的条件, 具体如下:

$$\begin{aligned} v &= (k_5 - 1)P_{copp1} < (k_5^2 - k_5)P_{c1} + (k_5^{1.5} - k_5)P_{E1} + (k_5^2 - k_5)P_{PM1} = u \\ w &= (k_5^2 - k_5)P_{c1} + (k_5^2 - k_5)P_{E1} + (k_5^2 - k_5)P_{PM1} < u \end{aligned}$$

当点“1”与点“5”距离非常接近时, $(k_5^2 - k_5)P_{E1}$ 略小于 $(k_5^{1.5} - k_5)P_{E1}$, 故 w 略小于 u , 故 w 大于 v , 化简可得:

$$P_{copp1} \geq k_5(P_{c1} + P_{E1} + P_{PM1})。$$

6、根据权利要求 1 所述的一种调节永磁同步电机高效率区域的方法, 其特征在于: 所述步骤 6 中的高效率区域所满足的条件具体如下:

$$\begin{aligned} P_{Vertical} &= P_{copp} - (P_{iron} + P_{PM}) \approx 0 \\ P_{Horizontal} &= P_{copp} - (P_c + P_E + P_{PM}) \approx 0 \end{aligned}$$

其中, P_{copp} 表示铜耗, P_{iron} 表示铁耗, P_{PM} 表示永磁体涡流损耗, P_c 表示涡流铁耗, P_E 表示附加铁耗; 当 $P_{vertical} > 0$ 时, 该点效率大于上方点的效率; 当 $P_{vertical} < 0$ 时, 该点效率大于下方点的效率; 当 $P_{Horizontal} > 0$ 时, 该点效率大于左边点的效率; 当 $P_{Horizontal} < 0$ 时, 该点效率大于右边点的效率; 若想将高效率区域调节至目标区域, 则要将目标区域的点的 $P_{vertical}$ 和 $P_{Horizontal}$ 优化至接近 0。

7、根据权利要求 1 所述的一种调节永磁同步电机高效率区域的方法, 其特征在于: 所述步骤 7 中的恒转矩区与恒功率区交界处区域, 在该区域的下方, 电流值较小, 速度较低, 因此电流角并未发生变化, 仍然满足恒功率区域高效率调节的条件。

8、根据权利要求 1 所述的一种调节永磁同步电机高效率区域的方法, 其特征在于: 所述步骤 8 中的永磁电机的铜耗、铁耗、永磁体涡流损耗分别可以用表达式表示, 具体如下:

$$\begin{aligned} P_{copp} &= \frac{mI^2 R}{2} \\ P_{iron} &= P_h + P_c + P_E \\ P_{PM} &= \frac{K^2 f^2 L_a B_m^2 L_m^2 V}{12\rho(L_a + L_m)} \end{aligned}$$

其中, m 表示电机的相数, I 表示绕组电流幅值, R 表示每相绕组电阻值, P_h 表示磁滞铁耗, K 表示电动势常数, f 表示频率, La 表示电机的轴向长度, B_m 表示最大磁密, L_m 表示永磁体宽度, V 表示体积, ρ 表示电阻率。铜耗可以通过改变绕组电流幅值或者绕组电阻值进行调节, 绕组电阻值在线径确定后主要由绕组长度决定; 铁耗可以通过改变电枢磁场或者永磁磁场的强弱进行调节; 永磁体涡流损耗可以通过转子开孔、永磁体径向或轴向分段、改变永磁体极弧系数、改变定子槽开口大小、更换永磁体材料进行调节。

9、根据权利要求 1 所述的一种调节永磁同步电机高效率区域的方法, 其特征在于: 所述步骤 8 中, 提出利用绕组、永磁体和硅钢片参数变化来调节高效率区三种损耗配比的方法具体为: 若要将高效率区域往上方或左边调节, 可以采用的手段有: 减小电流幅值增大绕组匝数、增加永磁体极弧系数、增加定子槽开口大小; 若要将高效率区往下方或右边调节, 可以采用的手段有: 增加电流幅值减小绕组匝数、减小永磁体极弧系数、减小定子槽开口大小、永磁体径向分段或轴向分段。

10、根据权利要求 1 所述的一种调节永磁同步电机高效率区域的方法, 其特征在于: 所提出的效率调节方法, 适用于任何形式的永磁电机。

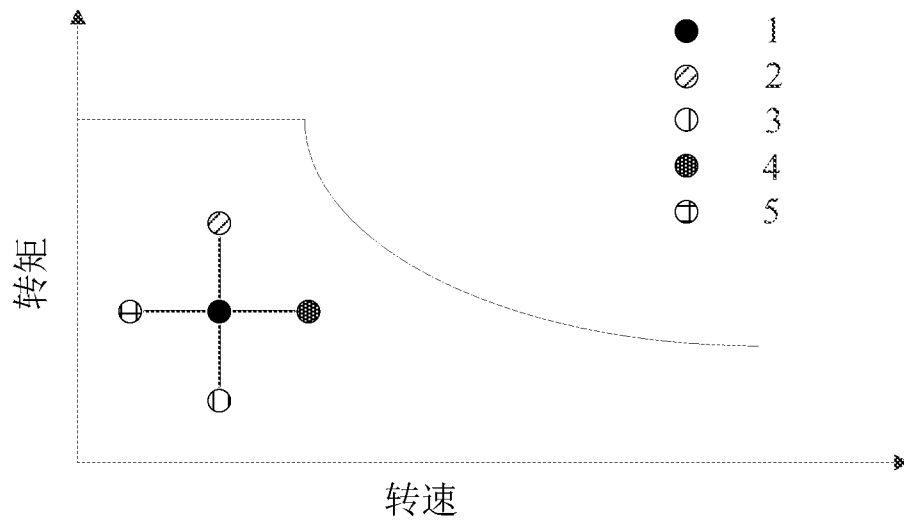


图 1

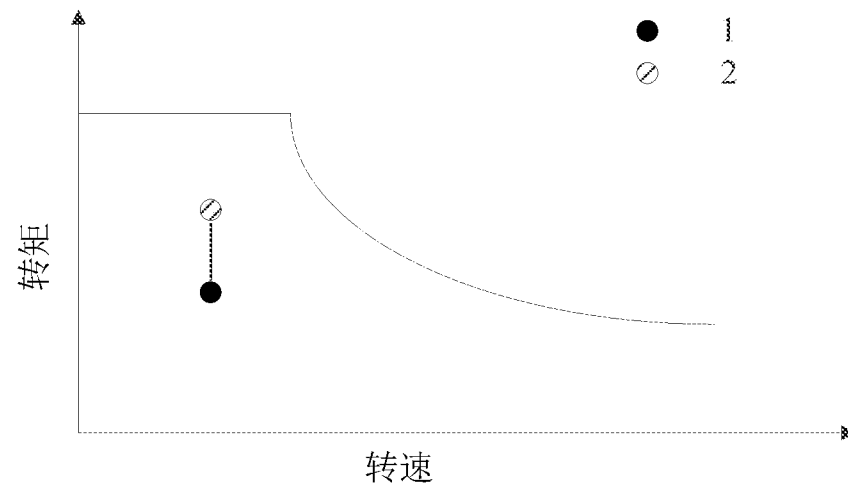


图 2

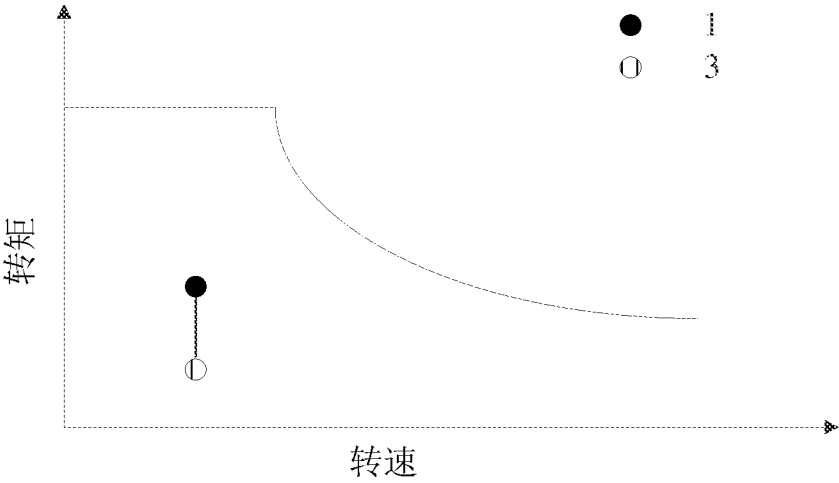


图 3

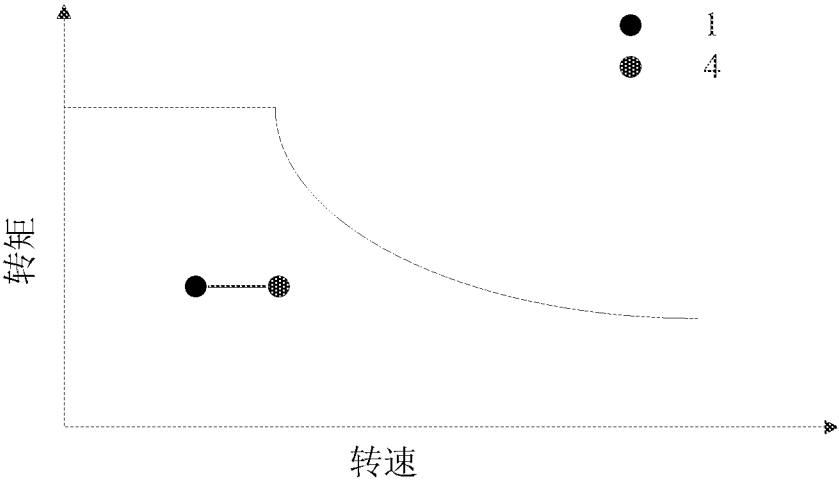


图 4

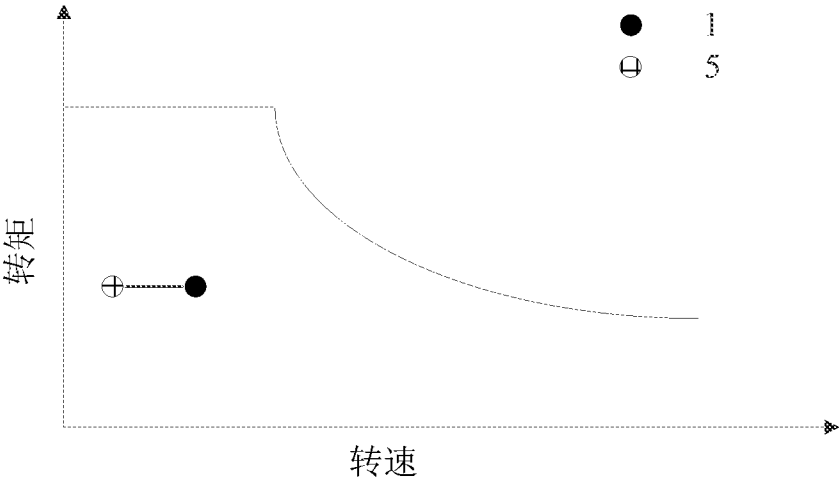


图 5

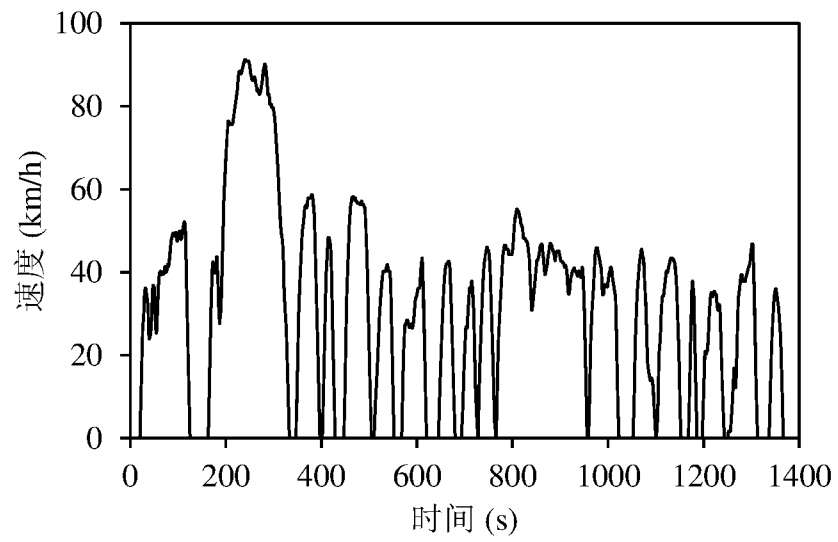


图 6

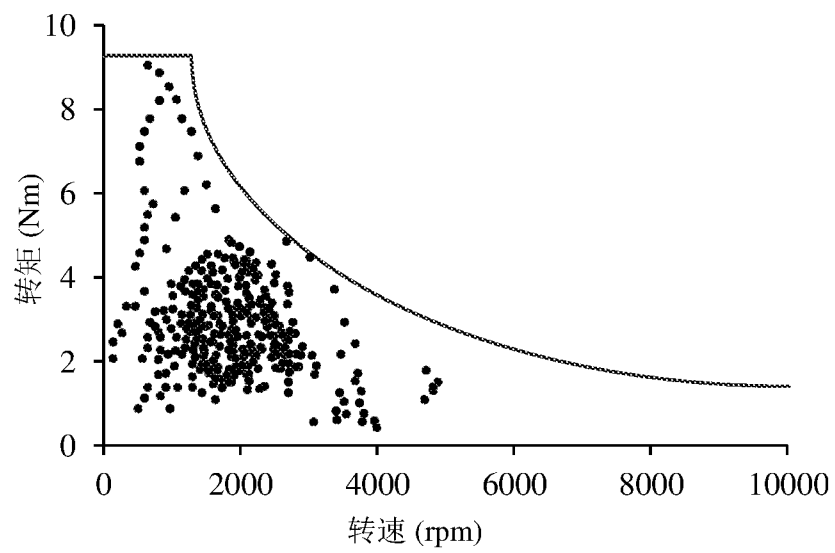


图 7

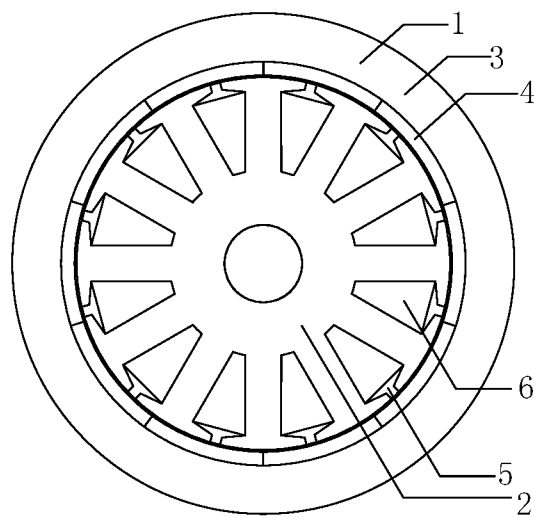


图 8

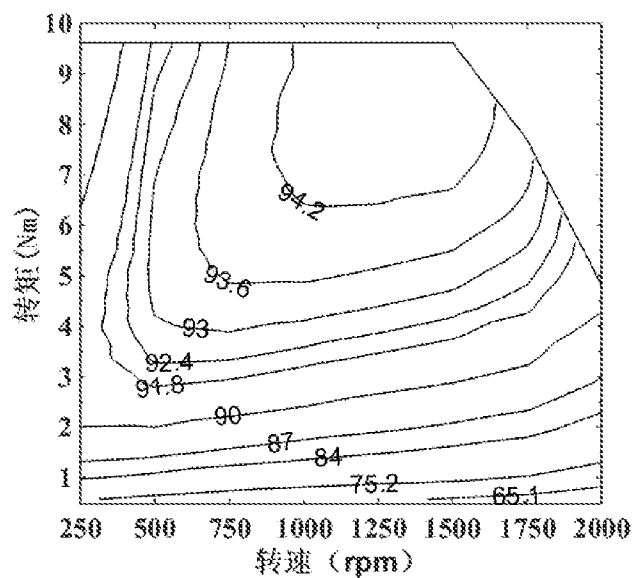


图 9

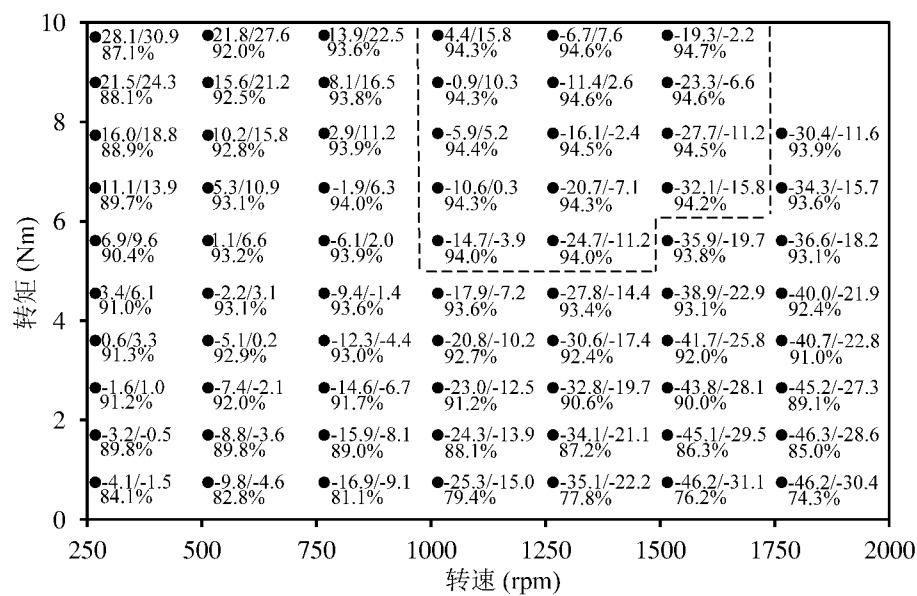


图 10

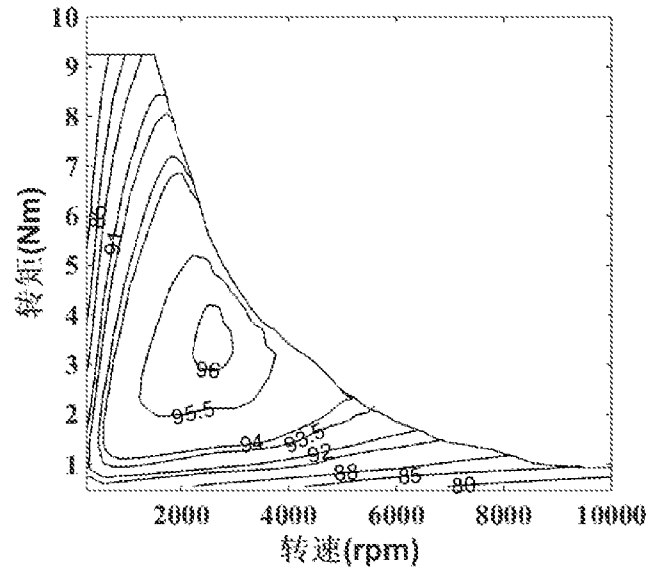


图 11

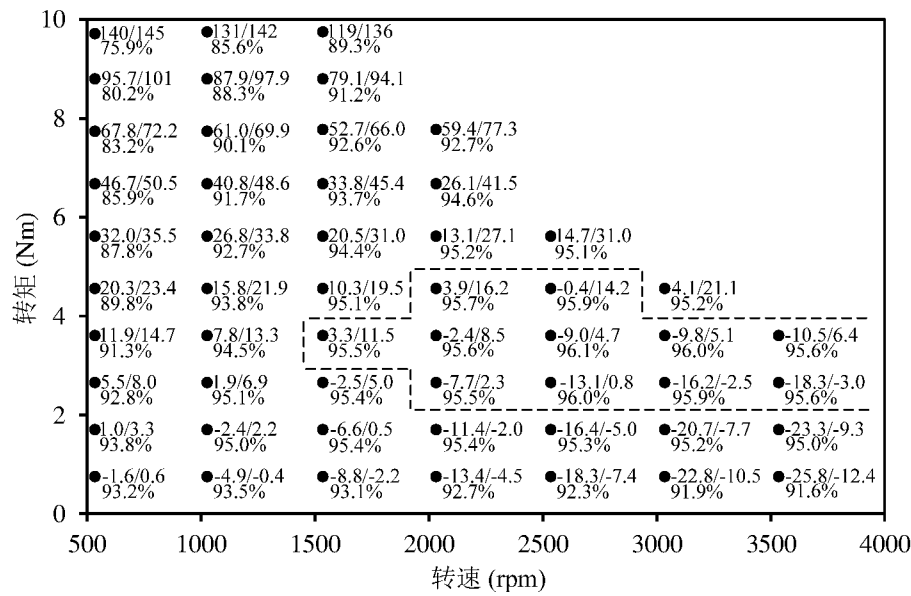


图 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/091038

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02P 23/00 (2016.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02P; H02K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CPRSABS; CNABS; CNTXT; DWPI; SIPOABS; CNKI; IEEE: 永磁, 同步, 转矩, 效率, 功率, 损耗, permanent, magnet, torque, efficiency, power, loss

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2005354779 A (MITSUBISHI JUKOGYO K.K.) 22 December 2005 (22.12.2005), entire document	1-10
A	CN 106612096 A (HYUNDAI MOTOR COMPANY) 03 May 2017 (03.05.2017), entire document	1-10
A	宋聚明等. 基于精确建模下的永磁同步电动机 (PMSM) 最佳效率控制研究. 电工电能新技术. 23 April 2004 (23.04.2004), 23(2), pp. 22-24. (SONG, Juming et al. Study of Efficiency-optimized Control Based on Accurate Modeling for PMSM. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy.)	1-10
A	Calogero Cavallaro et al. Efficiency Enhancement of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives by Online Loss Minimization Approaches. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 01 August 2005 (01.08.2005), 52(4), pp. 1153-1160	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 08 December 2017	Date of mailing of the international search report 27 December 2017
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer HUO, Yan Telephone No. (86-10) 62411641

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/091038

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP 2005354779 A	22 December 2005	None	
CN 106612096 A	03 May 2017	US 2017115168 A1	27 April 2017
		DE 102016214740 A1	27 April 2017

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/091038

A. 主题的分类 H02P 23/00 (2016.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																	
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) H02P; H02K 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CPRSABS; CNABS; CNTXT; DWPI; SIPOABS; CNKI; IEEE: 永磁, 同步, 转矩, 效率, 功率, 损耗, permanent, magnet, torque, efficiency, power, loss																	
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>JP 2005354779 A (MITSUBISHI JUKOGYO KK) 2005年 12月 22日 (2005 - 12 - 22) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106612096 A (现代自动车株式会社) 2017年 5月 3日 (2017 - 05 - 03) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>宋聚明等. "基于精确建模下的永磁同步电动机 (PMSM) 最佳效率控制研究" 电工电能新技术, 第23卷, 第2期, 2004年 4月 23日 (2004 - 04 - 23), 第22-24页</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>Calogero Cavallaro等. "Efficiency Enhancement of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives by Online Loss Minimization Approaches" IEEE Transactions on Industrial Electronics, 第52卷, 第4期, 2005年 8月 1日 (2005 - 08 - 01), 第1153-1160页</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	JP 2005354779 A (MITSUBISHI JUKOGYO KK) 2005年 12月 22日 (2005 - 12 - 22) 全文	1-10	A	CN 106612096 A (现代自动车株式会社) 2017年 5月 3日 (2017 - 05 - 03) 全文	1-10	A	宋聚明等. "基于精确建模下的永磁同步电动机 (PMSM) 最佳效率控制研究" 电工电能新技术, 第23卷, 第2期, 2004年 4月 23日 (2004 - 04 - 23), 第22-24页	1-10	A	Calogero Cavallaro等. "Efficiency Enhancement of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives by Online Loss Minimization Approaches" IEEE Transactions on Industrial Electronics, 第52卷, 第4期, 2005年 8月 1日 (2005 - 08 - 01), 第1153-1160页	1-10
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
A	JP 2005354779 A (MITSUBISHI JUKOGYO KK) 2005年 12月 22日 (2005 - 12 - 22) 全文	1-10															
A	CN 106612096 A (现代自动车株式会社) 2017年 5月 3日 (2017 - 05 - 03) 全文	1-10															
A	宋聚明等. "基于精确建模下的永磁同步电动机 (PMSM) 最佳效率控制研究" 电工电能新技术, 第23卷, 第2期, 2004年 4月 23日 (2004 - 04 - 23), 第22-24页	1-10															
A	Calogero Cavallaro等. "Efficiency Enhancement of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives by Online Loss Minimization Approaches" IEEE Transactions on Industrial Electronics, 第52卷, 第4期, 2005年 8月 1日 (2005 - 08 - 01), 第1153-1160页	1-10															
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																	
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> "T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件													
* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																
国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期																
2017年 12月 8日	2017年 12月 27日																
ISA/CN的名称和邮寄地址	授权官员																
中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10) 62019451	霍艳 电话号码 (86-10) 62411641																

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/091038

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
JP	2005354779	A	2005年 12月 22日	无			
CN	106612096	A	2017年 5月 3日	US	2017115168	A1	2017年 4月 27日
				DE	102016214740	A1	2017年 4月 27日