第 52 卷 第 4 期 电机与控制应用 Vol. 52 No. 4, April, 10, 2025
2025 年 4 月 10 日 Electric Machines & Control Application CCBY-NC-ND 4.0 License
DOI:10.12177/emca.2025.022 文章编号:1673-6540(2025)04-0412-10 中图分类号:TM 351 文献标志码:A

过载对屏蔽式永磁同步电机性能的影响

龚佳乐, 李 明*, 郑继鑫
(渤海大学 控制科学与工程学院,辽宁 锦州 121000)

Effect of Overload on Performance of Canned Permanent Magnet Synchronous Motors

GONG Jiale, LI Ming*, ZHENG Jixin
(College of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121000, China)

Abstract: **[Objective]** Canned permanent magnet synchronous motor (CPMSM) demonstrates excellent performance, including high efficiency and high power density. Due to its compact size, lightweight design, stable and reliable operation, and low maintenance requirements, it is widely used in precision-controlled industrial equipment such as vacuum pumps. During the vacuum pumping process, air may flow into the vacuum environment, causing the vacuum pump to operate under high load conditions and leading to CPMSM overload. **[Methods]** This study established a co-simulation model using Simulink and Ansys to analyze the electromagnetic and thermal fields of the motor, determining the safe operation duration and the variations in the electromagnetic field under overload conditions. Taking a 1.5 kW CPMSM as an example, different overload torque multiples were set to simulate impact loads. The one-way coupling method was used to calculate the temperature rise in the winding insulation and permanent magnets under overload conditions. **[Results]** The results showed that the winding insulation of the CPMSM reached its temperature limit after 516 s under 1.8 times the rated load. Continued operation beyond this limit would cause motor damage, while the permanent magnets could still function safely under this load. Therefore, the motor's safe operating time under overload was 516 s. In addition, the study revealed that after overload, regions with higher stator yoke magnetic flux density increased compared to rated load conditions, while the fundamental amplitude of the air gap flux density decreased, and the fundamental amplitude of the back electromotive force increased. After overload, motor's losses increased, while both efficiency and power factor decreased. Additionally, the torque fluctuations first decreased and then increased. **[Conclusion]** By establishing a simulation model, this paper provides an in-depth analysis of CPMSM's operating characteristics under overload conditions, providing a scientific basis for accurately determining the safe response time after temperature rise. The study summarizes the variations in electromagnetic performance after overloading, which is crucial for improving CPMSM performance.

Key words: canned permanent magnet synchronous motor; motor overload; motor temperature rise; motor performance

摘 要:**【目的】**屏蔽式永磁同步电机(CPMSM)具有高效率、高功率密度等优异的性能,凭借体积小、重量轻、运行稳定可靠及维护需求低等优点被广泛应用于真空泵等高要求的精密控制工业设备中。真空泵在抽真空工作中可能有空气流入真空环境中,导致真空泵高负载作业,从而使 CPMSM 过载。**【方法】**本文通过 Simulink 和 Ansys 构建联合仿真模型,对电机的电磁场及温度场进行分析,得出电机过载后的安全运行时间及电磁场的变化规律。以一台 1.5 kW CPMSM 为例,通过设置不同倍数的过载转矩模拟冲击载荷,采用单向耦合法计算 CPMSM 在过载状态下绕组绝缘及永磁体的温升。**【结果】**研究结果表明,CPMSM 的绕组绝缘在过载到 1.8 倍负载后的 516 s 时达到绝缘温度限制,之后继续工作将造成电机损坏,而永磁体在此负载下仍可继续安全工作,则电机过载后的安全运行时间为 516 s。此外,研究表明电机过载后相比于额定负载定子轭部磁密较大的区域增多,气隙磁密基波幅值减小,反电动势基波幅值增强。电机过载后损耗增加,效率和功率因数下降,转矩波动先减小后增大。**【结论】**本文通过构建仿真模型深入分析了 CPMSM 在过载状态下的运行特性,为精准确定电机过载状态下温度升高后的安全响应时间提供了科学依据,总结了电机过载后电磁性能的变化规律,对提升 CPMSM 的性能具有重要意义。

基金项目:辽宁省教育厅一般项目(LJ212410167024)
General Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJ212410167024)

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

关键词：屏蔽式永磁同步电机；电机过载；电机温升；电机性能

0 引言

近年来，真空泵通过去除气体，提供稳定的真空环境，广泛应用于制药、食品、化工和电子等行业[1]。目前真空泵多采用屏蔽式永磁同步电机（Canned Permanent Magnet Synchronous Motor，CPMSM）来驱动，其优势包括永磁体能提供稳定磁场、屏蔽结构有效防止真空泄漏、减少泵的振动和噪声，从而提升电机性能，确保获得清洁的真空环境[2]。然而，当 CPMSM 用于真空泵抽真空的工作时，真空环境可能因泄漏导致空气突然流入，此时电机为了维持真空状态，其负载将瞬间增大，造成电机过载[3]。过载状态下，电机随时可能因温度过高而损坏。因此，准确计算电机在过载条件下的性能变化，对于确保电机过载后的安全运行具有重要意义[4]。

对于永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor，PMSM）的过载能力及性能，已有不少学者做过研究。文献[5]通过改变绕组形式、齿宽和定子裂比等结构参数减弱了铁心磁饱和、电枢反应对电机转矩过载能力的影响，提高了电机的最大输出转矩。文献[6]分析了 PMSM 电磁负荷对过载能力的影响，并指出电磁负荷对提高电机转矩的作用较大，得出电机在常温与高温环境下的温升变化规律及短时高过载工况下温升的差异。文献[7]研究了基于热负荷约束下的高过载 PMSM 的电磁特性，提出了高过载电机铜损耗系数的概念，并分析了其在电机转矩过载中的影响及极限温升约束下电机输出能力的变化规律。文献[8]通过构建考虑铁心饱和和电枢反应的等效磁路模型，分析了热限制条件下铁心饱和程度对高过载永磁无刷直流电机转矩的影响，并计算电机损耗，分析电机性能。文献[9]研究了 PMSM 过载能力的影响因数，包括结构参数和定子铁心材料，并对电机过载后的性能进行分析，确定了优化 PMSM 过载能力的关键因素。

上述研究为电机过载状态下的性能分析提供了重要参考，但多集中于 PMSM 的相关研究。对于 CPMSM 在不同过载条件下的安全运行时间及电磁性能变化规律的研究仍显不足。因此本文采用一种场路耦合的方法[10]，通过建立 Simulink 与 Ansys 联合仿真模型分析电机在不同负载条件下的性能，计算电机损耗，并通过单向耦合的方法对电机进行温度场计算得到电机的温升曲线，确定电机在过载后的安全运行时间。同时得到电机过载后的电磁场及效率的变化规律。

1 方法及场路耦合模型的介绍

1.1 方法介绍

本文对电机过载后的热性能及电磁性能的分析流程如图 1 所示。根据图 1，具体分析步骤如下。

（1）设置初始温度。

（2）根据额定工况下的电机转矩，利用 Simulink 与 Ansys 联合仿真的方法，设置过载转矩来模拟冲击载荷，逐步递增负载转矩，求出不同负

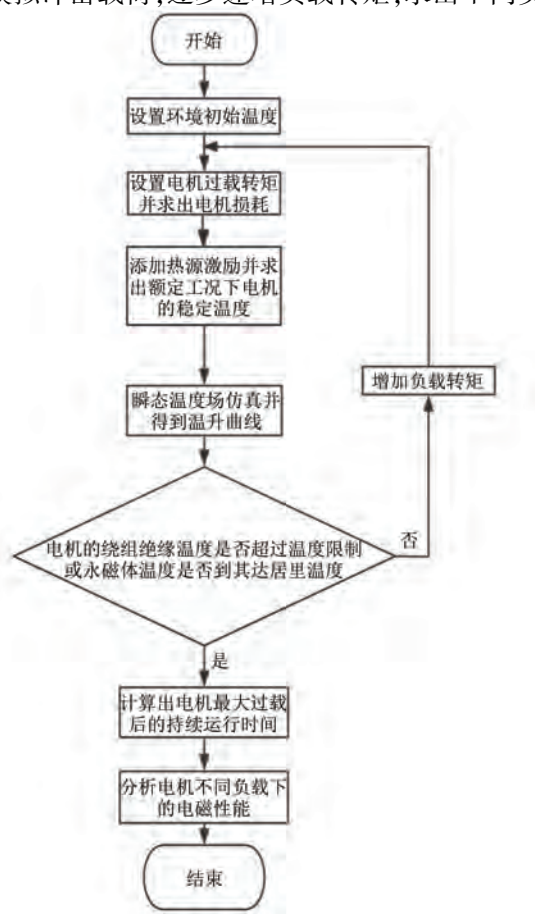


图 1 电机性能仿真流程图

Fig. 1 Flowchart of motor performance simulation

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

载下电机的损耗[11]。

(3)将电机各部分损耗与其体积的比值(即热流密度)作为热源[12],利用单向耦合的方法进行稳态温度场的计算,求出电机额定工况下的稳定温度。

(4)以电机额定工况下的稳定温度作为初始温度,依次对电机在各过载转矩下的瞬态温度场进行计算,得到永磁体和绕组绝缘的温升曲线。

(5)重复步骤(2)、(3)、(4)至电机绕组绝缘温度达到最大温度限制或永磁体温度达到其居里温度。如果未达到温度限制,则继续增加负载转矩;若达到了温度限制,则计算电机过载后的安全运行时间。

(6)利用场路耦合法分析电机不同负载下的电磁性能,并且计算其效率及功率因数,得出其变化规律。

1.2 模型介绍

本文以一台功率为 1.5 kW、额定转速为 9 000 r/min 的 CPMSM 为研究对象。该电机的屏蔽套由高耐腐蚀性和高机械强度的不锈钢 304 制成,永磁体的材料牌号为 N38UH,居里温度为 180 ℃,绕组绝缘等级为 F 级,最高耐受温度为 155 ℃。电机的基本参数如表 1 所示。

表 1 CPMSM 的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of CPMSM

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.5
额定电压/V	200
额定频率/Hz	450
极数	6
额定转矩/(N·m)	1.592
绝缘等级	F
永磁体材料	N38UH

基于表 1 提供的参数,采用 Simulink 与 Ansys 联合搭建场路耦合分析模型[13],如图 2 所示。在图 2 中,电机驱动电路采用由 6 个绝缘栅双极晶体管(Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT)组成的三相电压型逆变器电路,电机模型输出的电流、转速和角度信号反馈至 Simulink,用于实现仿真模拟试验,对电机过载后的电磁性能进行分析[14]。为详细研究电机在不同负载下的温度分布,以及求出电机在过载后的安全运行时间,建立如图 3 所示的温度场有限元计算模型。为了简化分析作出如下假设[15]。

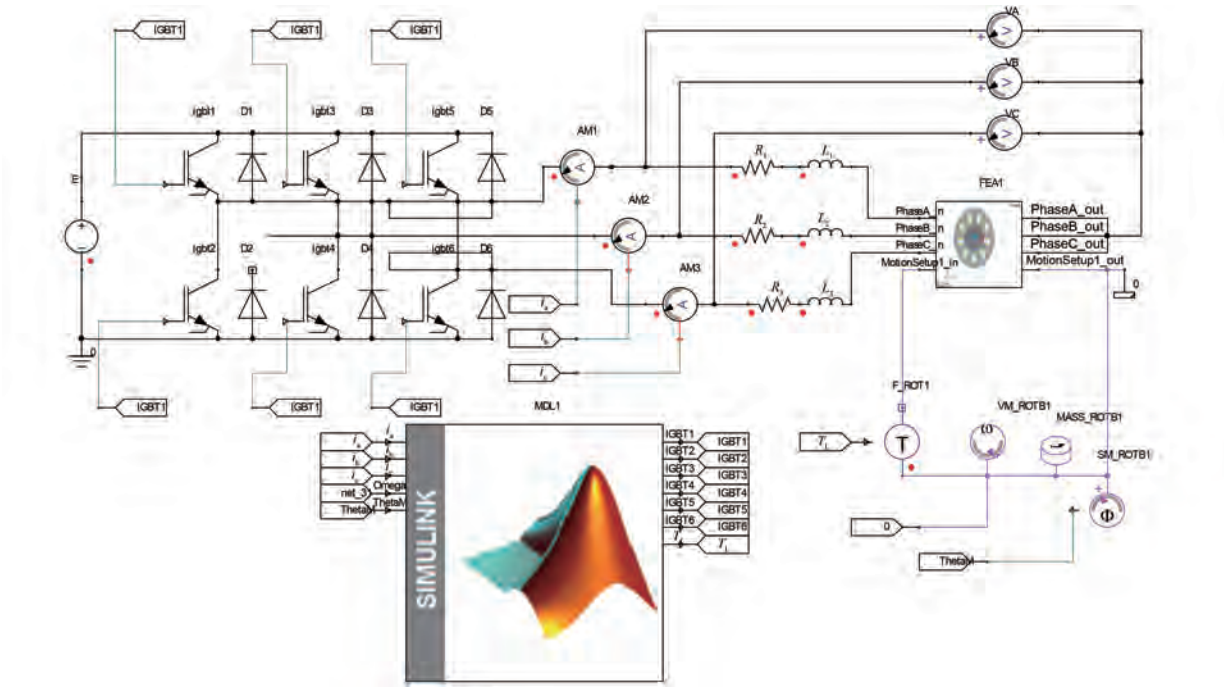


图 2 场路耦合分析模型

Fig. 2 Field-circuit coupled analysis model

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

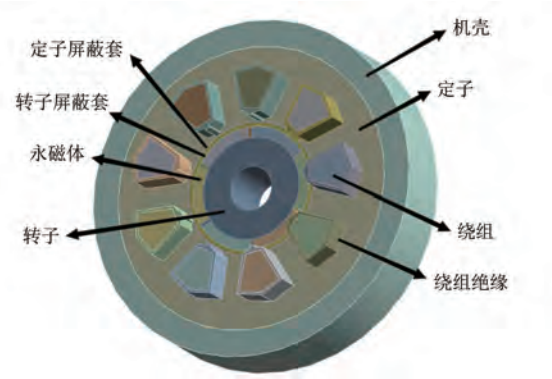


图 3　电机温度场有限元计算模型

Fig. 3　Finite element calculation model of motor temperature field

(1)假设定子绕组结构均匀,绕组的线圈数、排列方式和截面形状等在仿真模型中是均匀的。

(2)忽略材料热传导率随温度的变化。

2　过载对电机热性能的影响

2.1　电机热源的确定

利用搭建的场路耦合分析模型,对电机额定工况下的电磁场进行计算,求出电机各部分的损耗分布[16]。

铜耗是定子绕组通电时发热而引起的损耗,则铜耗的计算式为[17]

$$P_{cu} = mI^2R \tag{1}$$

式中:m 为电机的相数;I 为定子绕组的相电流有效值;R 为每相绕组的有效电阻值,其求解计算式为

$$R = \rho \frac{2Nl_{av}}{\pi\alpha\left[N_t\left(\frac{d}{2}\right)\right]^2} \tag{2}$$

式中:ρ 为铜线电阻率;l_{av} 为半匝线圈长;N 为每相绕组串联匝数;N_t 为并绕根数;α 为并联支路数;d 为铜线直径。

表 2 所示为额定工况下电机的损耗。通过有限元软件直接计算出电机的铁耗、永磁体损耗及屏蔽套损耗,通过式(1)和式(2)计算出电机铜耗[18],并将电机的损耗与体积的比值即热流密度作为热源,平均的赋值给电机模型各部分。由于屏蔽套的存在,电机运行时会在屏蔽套中产生大量的涡流损耗,这是一个不可忽视的损耗部分[19]。

表 2　CMPSM 额定工况下的损耗

Tab. 2　Losses of CMPSM under rated operating conditions

参数名称	损耗/W	热流密度/(W·mm^{-3})
铁心	34	2.76×10^{-5}
定子绕组	74.4	2.13×10^{-4}
永磁体	11.7	9.25×10^{-4}
屏蔽套	366.7	1.87×10^{-7}

2.2　过载对电机温度的影响

根据材料属性为电机温度场模型赋予相应的材料参数[20]。在额定工况下,对电机的稳态温度场进行仿真分析,得到电机的温度分布结果如图 4 所示。

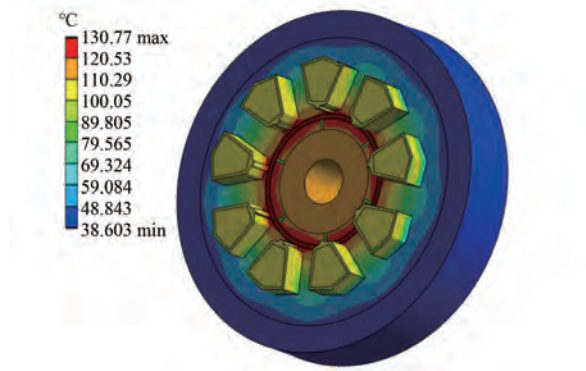


图 4　电机额定工况下稳态温度场温度分布图

Fig. 4　Distribution of steady-state temperature field of motor under rated operating conditions

由图 4 可知,电机额定工况下的最高温度为 130.77 ℃。逐步增加电机的负载转矩,计算在不同负载转矩下的稳态温度场。电机绕组绝缘及永磁体的温度计算结果如表 3 所示。

表 3　电机绕组绝缘及永磁体温度对比表

Tab. 3　Comparison of temperatures in motor winding insulation and permanent magnets

参数名称	绕组绝缘温度/℃	永磁体温度/℃
额定负载	130.77	124.5
1.2 倍负载	134.65	128.51
1.4 倍负载	139.48	133.41
1.6 倍负载	146.63	140.62
1.8 倍负载	156.25	145.95

由表 3 可知,当电机负载转矩增大至 1.8 倍时,绕组绝缘的最热点温度达到 156.25 ℃,已超过绕组绝缘的最大温度限制。在此温度下,若电

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

机继续运行,将导致绕组绝缘损坏。而在 1.8 倍负载时,电机永磁体的最热点温度为 145.95 ℃,并未达到永磁体的居里温度,永磁体仍可安全运行。

以额定工况下稳态温度场的计算结果作为初始条件进行瞬态温度场计算,得出绕组绝缘及永磁体在不断增大负载后的最热点温升曲线如图 5 和图 6 所示。

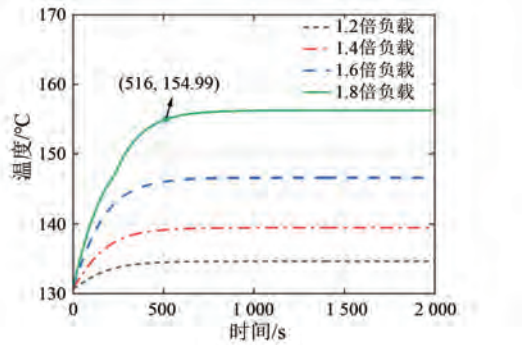


图 5 不同负载下绕组绝缘温升曲线

Fig. 5 Temperature rise curves of winding insulation at different loads

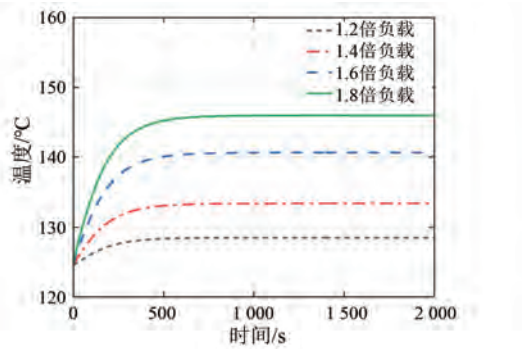


图 6 不同负载下永磁体温升曲线

Fig. 6 Temperature rise curves of permanent magnets at different loads

由图 5 可知,当电机负载转矩增大至 1.8 倍时,绕组绝缘温度在 516 s 时达到 155 ℃,达到其最大温度限制。由图 6 可知,在 1.8 倍负载下电机的永磁体温度并未达到其居里温度,仍可安全运行。因此,电机在突加 1.8 倍负载条件下的安全运行时间为 516 s,若运行时间超过 516 s,电机绕组绝缘温度将超过温度限制,导致绝缘损坏。若继续将电机负载增大至 2 倍时,得到绕组绝缘在突加 2 倍负载下的温升曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,当电机负载增大到 2 倍时,电机

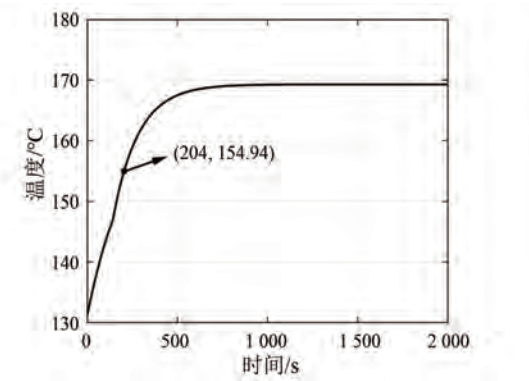


图 7 2 倍负载时绕组绝缘温升曲线

Fig. 7 Temperature rise curve of winding insulation at 2 times load

绕组绝缘温度在 204 s 时达到了其温度限制,相比于 1.8 倍负载时间缩短了 312 s。

3 过载对电机电磁性能的影响

3.1 过载对电机电磁场的影响

电机的气隙磁密是电机电磁性能的关键参数之一[21],直接影响电机的运行效率、输出转矩、反电动势和发热等多方面的性能[22]。图 8 为屏蔽

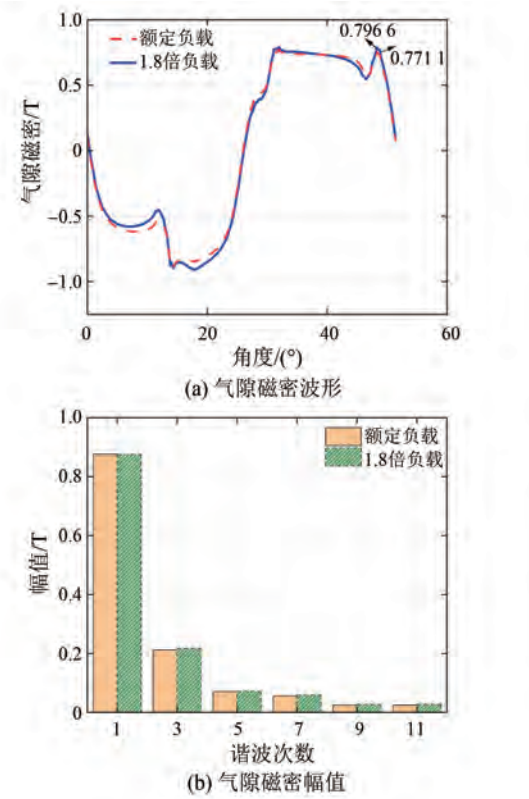


图 8 气隙磁密波形对比

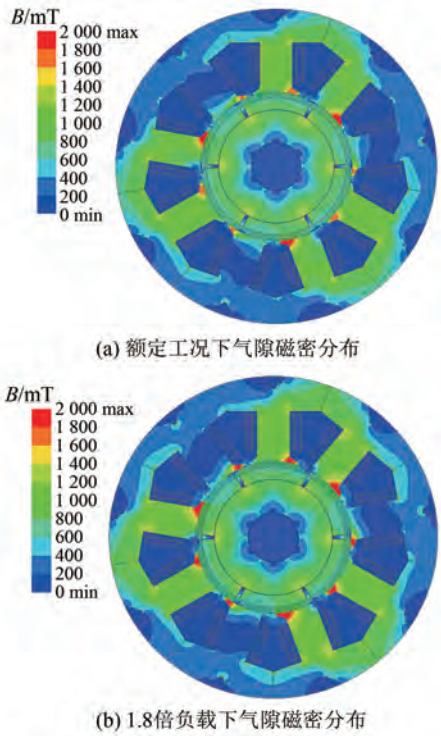
Fig. 8 Comparison of air gap flux density waveforms

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

电机过载后的气隙磁密波形。

由图 8(a)可知，电机过载后，CPMSM 的气隙磁密波形有所变化，在额定负载时，气隙磁密的幅值为 0.771 1 T；当负载转矩增大至 1.8 倍时，气隙磁密幅值增大至 0.796 6 T，增幅为 3.3%。由图 8(b)可知，电机在额定负载时，气隙磁密基波幅值为 0.876 3 T；当负载转矩增大至 1.8 倍时，气隙磁密基波幅值减小至 0.874 8 T，减小了 0.17%；3 次谐波幅值从 0.211 7 T 增大至 0.217 3 T，增大了 2.6%。在 1.8 倍负载条件下电机(5 次、7 次、9 次、11 次)谐波幅值皆略高于额定负载。

额定工况及过载后电机的磁密分布图如图 9 所示。



(a) 额定工况下气隙磁密分布

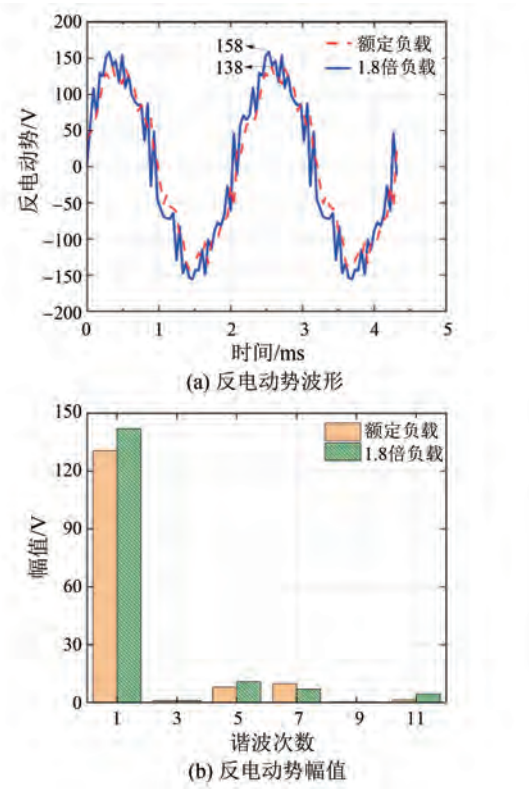
(b) 1.8倍负载下气隙磁密分布

图 9　电机磁密云图

Fig. 9　Contour maps of motor magnetic flux density

由图 9 可知，在电机额定工况和 1.8 倍负载下磁密分布都较为均匀，在定子轭部磁密较大。相比在于额定工况下，1.8 倍负载时电机定子轭部磁密较大的区域更多。因为 1.8 倍负载导致电机定子轭部磁路饱和程度增加，使得磁密较大的区域增多[23]。

为了进一步分析电机过载对电磁场的影响，计算了 CPMSM 额定负载和 1.8 倍负载运行时电机反电动势，结果如图 10 所示。



(a) 反电动势波形

(b) 反电动势幅值

图 10　电机负载反电动势波形图

Fig. 10　Motor load back EMF waveform diagram

由图 10(a)可知，当电机从额定负载增大到 1.8 倍负载时，负载反电动势峰值由 138 V 增加到 158 V，增加了 14.5%。由图 10(b)可知，电机在额定负载时的反电动势基波幅值为 130.65 V，当负载增大到 1.8 倍负载时，反电动势的基波幅值增大至 141.85 V，增大了 8.6%；5 次、11 次谐波也有所增加；3 次、9 次谐波变化较小；但 7 次谐波从 9.76 V 减小至 6.89 V，减小了 29.4%。总体来说，随着负载的增加，谐波幅值也有所增加，这是因为负载增加导致电流增大，引起磁路饱和和电枢反应，影响磁场分布，导致电机反电动势谐波增加。

3.2　过载对电机效率、功率因数、转矩波形的影响

通过对 CPMSM 损耗求解，得出电机铜耗、铁耗、永磁体损耗和屏蔽套损耗分别记为 P_{Cu}、P_{Fe}、P_m 和 P_{can}[24]。得到不同负载下电机损耗分布如表 4 所示。

由表 4 可知，从额定负载增加到 1.8 倍负载，电机的铁损从 34 W 增大到 40.9 W，增加了 20.3%；电机的铜损从 74.4 W 增大到 182.5 W，增加了 145.3%；电机的永磁体损耗从 11.7 W 增大

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

到 27.6 W,增加了 135.9%;电机的屏蔽套损耗则从 366.7 W 增大到 375.9 W,增加了 2.5%。

表 4 电机损耗分布表

Tab. 4 Motor loss distribution

参数名称	P_{Fe}/W	P_{Cu}/W	P_m/W	P_{can}/W
额定负载	34	74.4	11.7	366.7
1.2 倍负载	34.5	98.2	15.1	366.3
1.4 倍负载	36.3	122.2	18.6	368.8
1.6 倍负载	38.7	158.3	23	373.2
1.8 倍负载	40.9	182.5	27.6	375.9

电机输入功率的求解计算式[25]为

$$P_{in} = P_{out} + P_{Cu} + P_{Fe} + P_m + P_{can} + 1.8\%P_{out} \tag{3}$$

式中:P_{out} 为输出功率。

效率的计算式为

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \times 100\% \tag{4}$$

输出功率是电机实际产生的机械功,输入功率是电机吸收的电功率[26]。

功率因数是衡量电机运行效率和电能利用率的重要参数,其表示电机输入电流中有功功率与视在功率之间的比值。视在功率计算式为[27]

$$S = 3UI \tag{5}$$

式中:U、I 分别为相电压、相电流。

功率因数的计算式为[28]

$$\cos\varphi = \frac{P_{in}}{S} \tag{6}$$

不同的负载转矩下电机的效率与功率因数分析如表 5 所示。

表 5 效率和功率因数变化表

Tab. 5 Efficiency and power factor variations

参数名称	效率/%	功率因数
额定负载	74.5	0.94
1.2 倍负载	73.5	0.93
1.4 倍负载	72.4	0.91
1.6 倍负载	70.8	0.89
1.8 倍负载	69.6	0.88

如表 5 所示,CPMSM 在不同负载转矩下,效率和功率因数都下降。随着负载的增加,电机的效率从 74.5% 下降到 69.6%,下降了 6.1%;功率因数则从 0.94 下降到 0.88,下降了 6%。这表明,电机过载不仅导致电机损耗增加,还对电机的整体性能产生负面影响,降低了电机的工作效率和功率因数。适度增加负载可以优化磁通分布,提高转矩平稳性,但过载则会导致磁饱和和电流谐波影响,反而增加转矩波动。

电机过载后对转矩波形的分析如图 11 所示。电机在不同倍数的负载下,电机的转矩波动呈现出先减小后增大的趋势。具体来说,电机的转矩波动从额定负载的 22.4% 下降到 1.4 倍负载的 10.8%,下降幅度为 51.8%;从 1.4 倍负载增加到 1.8 倍负载,电机转矩波动从 10.8% 增加到 11.4%,增加幅度为 5.6%。

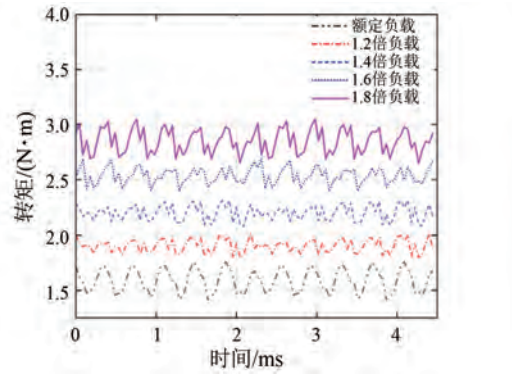


图 11 电机转矩波形图

Fig. 11 Motor torque waveform diagram

4 试验验证

为了进一步分析验证计算结果的有效性,本文按照 GB/T 22669-2008《三相永磁同步电动机试验方法》,采用反拖法对样机空载反电动势进行测定,即用原动机与被测样机进行机械连接,原动机拖动被测样机在同步转速下作为发电机空载运行,分别测量被测电动机的出线端电压 U_{ab}、U_{bc}、U_{ac},取其平均值作为空载反电动势线电压值。测量结果与仿真结果对比如图 12 所示。

由图 12 可知,样机反电动势波形与仿真结果具有较好的一致性。实测样机空载反电动势有效值为 145.3 V,仿真计算值为 147.2 V,两者仅相差 1.31%;电机负载状态下的反电动势为 138 V,比样机空载反电动势低 5%,验证了仿真结果的有效性。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

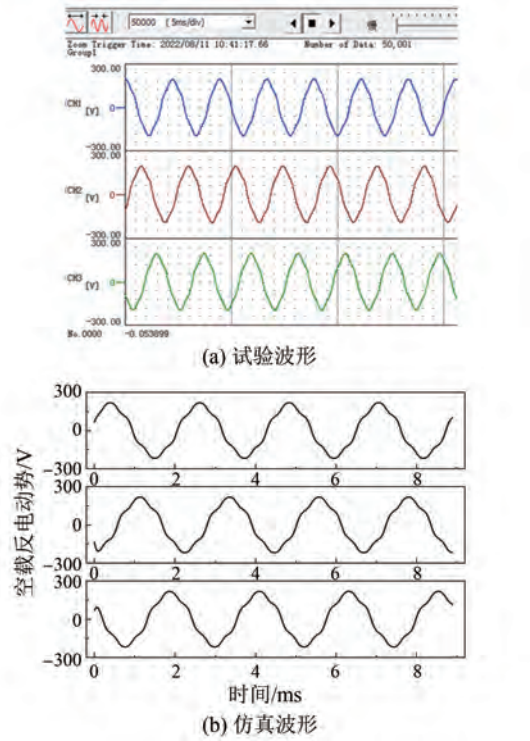


图 12　样机空载反电动势波形

Fig. 12　Prototype no-load back EMF waveforms

5　结语

本文以一台 1.5 kW CPMSM 进行研究，通过场路耦合方法对电机过载后的性能进行分析。所得结论如下。

(1)电机突加 1.8 倍负载 516 s 后绕组绝缘达到了温度限制，之后继续运行将造成电机损坏，电机的永磁体在 1.8 倍负载下仍可安全工作，若继续将电机负载增大至 2 倍，则在 204 s 后电机绕组绝缘达到温度限制。

(2)对电机电磁场分析结果表明，电机过载后，气隙磁密基波幅值减小，其余谐波幅值增加，负载状态下反电动势 7 次谐波幅值减小，基波幅值及 5 次、11 次谐波幅值增加，电机定子轭部磁密较大的区域增多。电机负载的增加使电机各部分损耗增大，电机效率和功率因数下降，影响电机整体性能。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

龚佳乐、李明进行了方案设计、内容总结与论文撰写，龚佳乐、郑继鑫进行了试验研究，龚佳乐、李明参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary, and paper writing were carried out by Gong Jiale and Li Ming. The experiment was conducted by Gong Jiale and Zheng Jixin. The manuscript was revised by Gong Jiale and Li Ming. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参 考 文 献

[1] 邓文宇，齐丽君，王光玉，等. 中国高端真空泵驱动电机及控制技术的现状和发展[J]. 电机与控制应用，2020，47(7)：1-8.
DENG W Y，QI L J，WANG G Y，et al. Present situation and development of drive motor and control technology for high-end vacuum pump in China [J]. Electric Machines & Control Application，2020，47(7)：1-8.

[2] 安跃军，陈嘉伟，邓文宇，等. 真空干泵用屏蔽电机抗冲击持续带载能力评估与实验[J]. 电机与控制学报，2021，25(10)：67-77.
AN Y J，CHEN J W，DENG W Y，et al. Evaluation and experiment of impact resistance and continuous load capacity of canned motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines and Control ，2021，25(10)：67-77.

[3] 毕晓舜. 提高真空泵用变频异步电机抗冲击能力的方法和效果分析[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2020.
BI X S. Method and effect analysis of improving the impact resistance of variable frequency asynchronous motor for vacuum pump [D]. Shenyang：Shenyang University of Technology，2020.

[4] 安跃军，杨维国，胡鑫，等. 真空干泵用定子拼装式永磁电机性能分析与实验[J]. 电机与控制学报，2020，24(3)：114-122.
AN Y J，YANG W G，HU X，et al. Performance analysis and experiment of stator assembled

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

permanent magnet motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(3): 114-122.

[5] 李立毅, 张江鹏, 闫海媛, 等. 高过载永磁同步电机的电磁特性[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 125-134.
LI L Y, ZHANG J P, YAN H Y, et al. Electromagnetic characteristics of high overload permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 125-134.

[6] 刘毓希, 李立毅, 曹继伟, 等. 短时高过载永磁同步电机电磁热研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2296-2305.
LIU Y X, LI L Y, CAO J W, et al. Electromagnetic thermal analysis for short-term high-overload permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2296-2305.

[7] 李立毅, 张江鹏, 赵国平, 等. 考虑极限热负荷下高过载永磁同步电机的研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 845-852.
LI L Y, ZHANG J P, ZHAO G P, et al. Research on high overload permanent magnet synchronous motor considering ultimate thermal load [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 845-852.

[8] 刘鹏, 李全武, 薛志鹏, 等. 热限制下铁芯饱和对永磁无刷直流电机过载转矩的影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(33): 14243-14252.
LIU P, LI Q W, XUE Z P, et al. Influence of core saturation on overload torque of permanent magnet brushless DC motor under heat restriction [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(33): 14243-14252.

[9] 董春雷, 董菲, 王毅, 等. 基于电磁负荷优化的永磁同步电机过载能力研究[J]. 微电机, 2022, 55(8): 33-37.
DONG C L, DONG F, WANG Y, et al. Analysis of overload capacity on permanent magnet servo motor with electromagnetic load optimization [J]. Micromotors, 2022, 55(8): 33-37.

[10] 周舒昊, 李明. 时间谐波对永磁屏蔽电机损耗及效率特性的影响分析[J]. 微电机, 2023, 56(9): 4-8+13.
ZHOU S H, LI M. Analysis of influence of time harmonics on loss and efficiency characteristics for canned permanent magnet motor [J]. Micromotors, 2023, 56(9): 4-8+13.

[11] 李明辉, 张涛, 郑涛, 等. 电机损耗研究综述及展望[J]. 机械研究与应用, 2024, 37(1): 182-186.
LI M H, ZHANG T, ZHENG T, et al. Review and prospect of motor loss research [J]. Mechanical Research and Application, 2024, 37(1): 182-186.

[12] 于添昊, 李明, 伦淑娴. 屏蔽套材料对屏蔽式永磁同步电机电磁场和温度场的影响研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 90-101.
YU T H, LI M, LUN S X. Study on the influence of can sleeve material on electromagnetic field and temperature field of canned permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 90-101.

[13] 曹艺凡, 邓召文, 高伟, 等. 永磁同步电机电磁性能仿真及影响因素分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2024, 51(1): 38-44.
CAO Y F, DENG Z W, GAO W, et al. Electromagnetic performance simulation and influence factors analysis of permanent magnet synchronous motor [J]. Tractor and Farm Transporter, 2024, 51(1): 38-44.

[14] 王伟炳, 陈新科. 基于联合仿真的表贴式永磁游标电机的伺服系统设计[J]. 微特电机, 2024, 52(10): 48-53.
WANG W B, CHEN X K. Servo system design of surface-mounted permanent magnet vernier motor based on co-simulation [J]. Small & Special Electrical Machines, 2024, 52(10): 48-53.

[15] 胡圣明. 永磁同步电机匝间短路故障温度场的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
HU S M. Research on thermal field of inter-turn short circuit fault of permanent magnet synchronous motor [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.

[16] 穆海琦, 周舒昊, 于添昊, 等. 真空泵用屏蔽式永磁同步电机电磁场-温度场互相迭代计算方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 113-122.
MU H Q, ZHOU S H, YU T H, et al. Electromagnetic field-temperature field iterative calculation method of canned permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 113-122.

[17] 孙立翔, 周晓燕. 永磁同步电机的损耗分析[J].

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

电工技术，2019，(20)：159-161.
SUN L X，ZHOU X Y. Loss analysis of permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Engineering，2019，(20)：159-161.

[18] 王博文，安辉，陆艳君，等. 真空干泵用永磁-磁阻复合式同步电机设计与分析[J]. 电机与控制应用，2024，51(7)：64-73.
WANG B W，AN H，LU Y J，et al. Design and analysis of permanent magnet-reluctance composite synchronous motor for vacuum dry pumps [J]. Electric Machines & Control Application，2024，51(7)：64-73.

[19] 陶果，马涛. 新型永磁同步屏蔽电机设计研究[J]. 微电机，2021，54(10)：45-48.
TAO G，MA T. Research of novel PM synchronous canned motor [J]. Micromotors，2021，54(10)：45-48.

[20] 刘强. 永磁同步驱动电机电磁损耗及温度场研究[D]. 上海：上海交通大学，2020.
LIU Q. Study on electromagnetic loss and thermal model of permanent magnet synchronous motor used in drive system [D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2020.

[21] 刘文奇，崔皆凡，李柏昕，等. 分数槽永磁同步直线电机空载气隙磁密解析[J]. 电机与控制应用，2021，48(4)：65-70+109.
LIU W Q，CUI J F，LI B X，et al. Analysis of no-load air gap flux density of fractional-slot permanent magnet synchronous linear motor [J]. Electric Machines & Control Application，2021，48(4)：65-70+109.

[22] 丁鸿昌，刘鲁伟，吕楠，等. 表贴式永磁同步电机气隙磁密的计算与分析[J]. 计算机仿真，2018，35(4)：179-183.
DING H C，LIU L W，LV N，et al. Calculation and analysis of air gap magnetic density of surface-mount permanent magnet synchronous motor [J]. Computer Simulation，2018，35(4)：179-183.

[23] 谢颖，杨艳会，蔡蔚，等. 兆瓦级高速永磁同步电机偏心状态下电机性能及转子振动特性分析[J]. 电机与控制学报，2024，28(9)：81-94.
XIE Y，YANG Y H，CAI W，et al. Analysis of rotor vibration characteristics of megawatt high speed permanent magnet synchronous motor under eccentric state [J]. Electric Machines and Control，2024，28(9)：81-94.

[24] 毛文贵，郭杰，裴世雄，等. 基于信赖域模型管理技术的永磁同步电机多目标优化[J]. 机械设计，2024，41(1)：153-160.
MAO W G，GUO J，PEI S X，et al. Multi-objective optimization of permanent-magnet synchronous motor based on trust-domain model management technology [J]. Journal of Machine Design，2024，41(1)：153-160.

[25] 褚赛. 屏蔽式永磁电机的屏蔽套效应及涡流分析[D]. 徐州：中国矿业大学，2020.
CHU S. Analysis of can effect and eddy current of canned permanent magnet motor [D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2020.

[26] 严浪涛，刘光银，任亦然. 双边型直线电机控制策略研究与仿真[J]. 现代电子技术，2024，47(22)：83-89.
YAN L T，LIU G Y，REN Y R. Research and simulation of control strategy for bilateral linear motor [J]. Modern Electronic Technology，2024，47(22)：83-89.

[27] 高雨翔，蔡奇新，徐文林. 基于牵引负荷负序功率潮流计算及电能计量方式研究[J]. 电测与仪表，2023，60(1)：193-200.
GAO Y X，CAI Q X，XU W L. Study on negative sequence power flow calculation and electric energy metering mode of traction load [J]. Electrical Measurement and Instrumentation，2023，60(1)：193-200.

[28] 杨雪淞，黄文，邓云川. 电气化铁路新型功率因数计量方法[J]. 电气化铁道，2020，31(4)：19-22.
YANG X Z，HUANG W，DENG Y C. A new power factor measurement method for electrified railways [J]. Electric Railway，2020，31(4)：19-22.

收稿日期：2025-01-02
收到修改稿日期：2025-02-10
作者简介：
龚佳乐(2001-)，男，硕士研究生，研究方向为特种电机设计及多物理场研究，gjl2023008020@bhu.edu.cn；
*通信作者：李 明(1987-)，男，博士，副教授，研究方向为特种电机设计及控制技术，liming1@qymail.bhu.edu.cn。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.