

一种双爪极构造发电机的研究

李德胜, 张龙喜, 王锦

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘 要: 提出一种自励式汽车缓速器用双爪极构造发电机。它的转子两侧爪极交错排列, 构成轴向磁路中 N 极和 S 极爪极磁极。基于 JMAG 软件, 研究了发电机空载和负载时的气隙磁场, 以及电枢反应对气隙磁场的影响。通过对爪极发电机漏磁的分析和相关结构的优化, 给出了空载时电机结构参数与漏磁系数的关系曲线图, 得出结论为进一步研究及优化该类电机提供了理论依据。最后给出了该电机空载特性和负载调节特性, 可以满足自励式缓速器所需励磁功率。

关键词: 爪极发电机; 气隙磁场; 结构参数; 漏磁系数

中图分类号: **文献标识码:** **文章编号:**

Research of Double Claw-pole Structure Generator

LI De-sheng, ZHANG Long-xi, WANG Jin

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: This paper introduces a kind of double claw-pole structure generator for self-excited retarder. Claw pole staggered on both sides of the rotor, axial magnetic circuit constituting the N-pole and S-pole magnetic pole. Based on the JMAG software, simulation of the generator no-load and load of the air gap magnetic field, the influence of armature reaction on the air gap magnetic field. Through the optimization analysis and correlation structure of the claw-pole alternator magnetic leakage, draw the no-load motor structure parameters and magnetic flux leakage coefficient curve, obtained the conclusion provides theoretical reference for the further research and optimization of this kind of motor. Finally, the no-load characteristics and regulation characteristics were given, could meet the required excitation power for self-excited retarder.

Key words: claw-pole alternator; air-gap field; structural parameter; leakage coefficient

自励式汽车缓速器作为一种节能、环保、高效的汽车辅助制动装置, 有着很好的应用前景^[1]。它的发电机作为缓速器的重要组成部分, 其工作稳定性和可靠性对于缓速器至关重要。近年来, 作者在电磁液冷缓速器研究的过程中, 提出了一种带有爪极发电机的自励式缓速器结构^[2]。本文在该发电机

结构设计基础上, 采用 JMAG 电磁仿真软件进行了三维建模和有限元分析, 对该发电机空载和负载时的气隙磁场进行了计算仿真; 通过对电机本身结构参数的漏磁情况分析, 探讨了漏磁系数的影响因素。最后, 数值模拟了该发电机的空载特性和负载调节特性, 结果表明该电机可以满足自励式缓速器所需

收稿日期: 2013-11-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277005).

作者简介: 李德胜(1962—), 男, 教授, 博士生导师. 主要从事机电一体化研究, E-mail:

dsli@bjut.edu.cn

励磁功率。

1 发电机构造原理及结构设计

具有爪极发电机的自励式缓速器原理图如图 1 所示, (缓速器的工作原理请参考文献[2])。在该缓速器中, 发电机所发的三相交流电, 经全桥整流后, 给缓速器提供所需励磁电流, 故缓速器不再需要从汽车电瓶取电, 实现自励。这里, 根据缓速器的技术参数确定发电机基本参数: 发电机输出功率 $P \geq 2.2\text{kw}$, 设定缓速器负载电阻 $R=3\Omega$, 则直流输出电压 U 在汽车传动轴转数 $n=750\text{rpm}$ 时不低于 90V 。提出的爪极发电机由缓速器支架、爪极转子、定子铁心和励磁线圈组成, 如图 2、3 所示, 这种结构无附加气隙, 与普通汽车用爪极发电机[3]比较, 电磁利用率较高, 并且可实现无刷构造, 可靠性高。

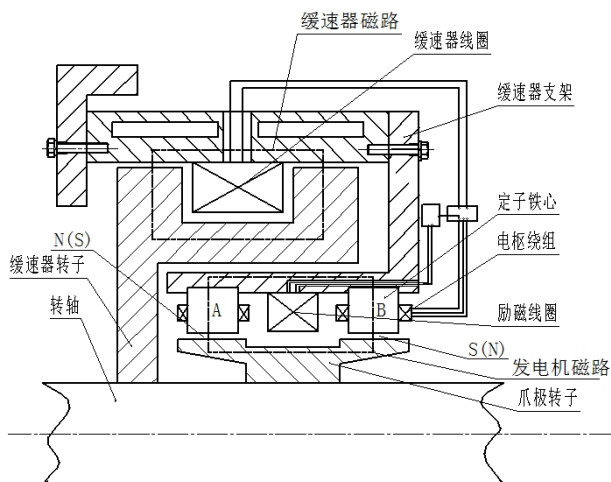


图1 自励式缓速器原理图

Fig.1 Self-excited Eddy Current Retarder

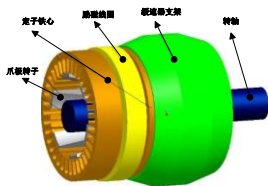


图2 爪极发电机整体模型

Fig.2 claw-pole alternator

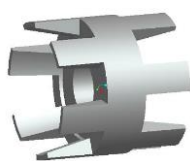


图3 爪极发电机转子模型

Fig.3 rotor

根据工作条件设计的爪极发电机的各部分参数如表1所示

表1 爪极发电机参数表

Table1 parameters of Claw-pole generator

功率 /Kw	电压/V	定子外 径/mm	定子内 径/mm	转子外 径/mm	气隙长 度/mm
2.5	100	318	278	276	1
槽数	单边电 枢长度 /mm	极数	每槽导 体数	极弧系 数	节距

36 70 12 15 0.78 6

2 发电机的三维电磁场仿真

基于有限元仿真软件JMAG对该发电机进行了建模与仿真。由于本文研究的爪极发电机结构较复杂、不规则, 磁路呈典型的三维磁场特性。因三维电磁场中矢量位 A 具有三个分量 A_x 、 A_y 、 A_z , 所以三维电磁场中的有限元法要比平面电磁场复杂许多。

电机内的磁场可视为三维恒定磁场, 因而满足下述的 Maxwell 方程:

$$\Delta \times (\nu \Delta \times A) = J \quad (2-1)$$

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix}, \nu = \begin{pmatrix} \nu_x & 0 & 0 \\ 0 & \nu_y & 0 \\ 0 & 0 & \nu_z \end{pmatrix}$$

将式 2-1 展开, 可得如下三个偏微分方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_z \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right\} - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_y \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \right\} = J_x \\ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_x \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \right\} - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_z \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right\} = J_y \\ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_y \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \right\} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_x \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \right\} = J_z \end{cases} \quad (2-2)$$

同样, 由矢量 A 的定义, 可将磁感应强度 B 的三个分量 B_x 、 B_y 、 B_z 写成如下形式:

$$\begin{cases} B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} = A_{zy} - A_{yz} \\ B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} = A_{xz} - A_{zx} \\ B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} = A_{yx} - A_{xy} \end{cases} \quad (2-3)$$

磁密 B_R 就等于:

$$B_R = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (2-4)$$

进一步磁场强度 H 的三个分量也同样可以上述形式表达:

$$\begin{cases} H_x = \nu_x B_x = \nu_x (A_{zy} - A_{yz}) \\ H_y = \nu_y B_y = \nu_y (A_{xz} - A_{zx}) \\ H_z = \nu_z B_z = \nu_z (A_{yx} - A_{xy}) \end{cases} \quad (2-5)$$

在给定边界条件下, 通过上述偏微分方程组,

就可以得到磁场内任意一点的矢量位 A ，带入式 (2-4)，就可以得到该点的磁密。

2.1 空载时爪极电机的磁场

爪极电机的空载是指电枢电流等于零，或者很小，因而可以忽略不计的情况。由于电枢电流为零，所以空载时爪极电机内的磁场只由励磁绕组的磁动势单独激励产生^[4]，如图 6 所示。

利用爪极发电机的实体模型建立网络模型，通过电磁场三维有限元计算，求解此模型，可得其全部的磁场分布图^[5]。图 4 所示为整体网格剖分图；图 5 所示为电机的总体（不包括空气和绕组）磁密分布图；图 6 所示为电机总体的磁场磁密矢量分布图。

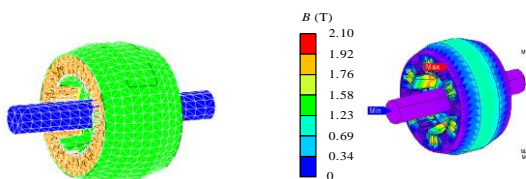


图 4 电机整体网格剖分图

Fig.4 mesh of generator

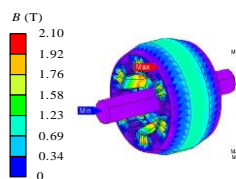


图 5 电机整体磁密云图

Fig.5 magnetic cloud of generator

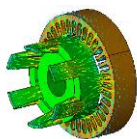


图 6 爪极转子磁密矢量图

Fig.6 flux density vector of rotor

从图 4、图 5、图 6 可以看出爪极发电机在空载时的磁场分布情况。转子的轴向励磁磁通通过爪极的特殊结构变成了气隙磁场的径向磁通。励磁线圈产生的磁场在电机内部形成了完整的磁路，通过爪极实现了 N、S 磁极交替。

2.2 负载时的爪极发电机的磁场和电枢反应

爪极发电机带上负载时，电枢绕组中就有电流流过，载流的电枢绕组将产生电枢磁动势。此时，气隙磁场将由爪极磁动势和电枢磁动势两者合成磁动势所建立。负载时电枢磁动势对主磁场的影响成为电枢反应^[4]。通过在气隙中取一个气隙面来研究电枢反应对气隙磁场的影响，比较爪极发电机空载和负载时的气隙磁密变化，定性的反映出爪极发电机的电枢反应。取转子与定子位置相同时刻的气隙面空载和纯电阻性负载 ($R = 3 \Omega$) 仿真气隙磁密波形如图 7 所示。

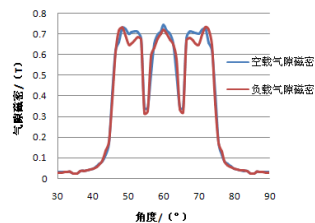


图 7 爪极发电机气隙磁密

Fig.7 air gap magnetic density of claw-pole generator

对图 7 的观察可知，和空载相比较，负载时气隙磁通密度波形发生了畸变。在负载时电励磁爪极发电机的主极气隙磁场是由电枢绕组和励磁绕组的合成磁动势决定。由于电枢反应的影响，电枢绕组上会产生出一系列奇次谐波电动势和电流，使发电机的电压波形产生畸变，电机损耗增加，从而导致了负载时气隙磁密基波幅值变小和波形畸变。

3 漏磁系数的数值分析

爪极式结构的发电机，存在着效率低、能耗大、低速发电能力差的缺陷，其主要原因是漏磁所带来的负面影响。为了改善和提高发电机的输出特性，特别是低速输出特性，有必要定量分析漏磁所带来的负面影响^[6]。下面主要分析爪极发电机的漏磁问题。图 8 清楚地描绘出了爪极发电机内部的磁场走向，可以看出爪极转子的漏磁通较复杂，一般可分为：(1) 两爪极根部经定子铁芯空间而闭合的漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ ；(2) 两爪极外端面之间的漏磁通 $\Phi_{\sigma 2}$ ；(3) 转子轭部经励磁线圈空间的漏磁通 $\Phi_{\sigma 3}$ 。

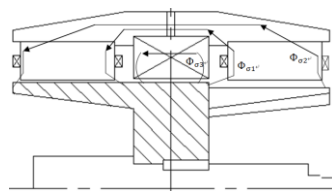


图 8 爪极发电机漏磁通分布情况

Fig8. leakage flux distribution of claw-pole generator

记爪极发电机励磁产生总磁通量为 Φ_m ，穿过气隙的主磁通为 Φ ，则有

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2} + \Phi_{\sigma 3} = \sigma \Phi \quad (3-1)$$

式中 σ 为磁极漏磁系数。 σ 值过大，设计就不够经济，且对电机的运行特性可能产生不良影响^[3]。

这里主要分析计算空载时爪极发电机的结构参数对电机漏磁系数的影响，这些参数包括：定子内径、转子外径、定子铁心有效长度、定子齿宽和爪极根部厚度。采用三维有限元法，求解域为 1/6 电机模型，在周期性对称面上满足的边界条件为：

$$\begin{cases} B_r(r, \varphi + \Delta\varphi, -z) = -B_r(r, \varphi, z) \\ B_\varphi(r, \varphi + \Delta\varphi, -z) = -B_\varphi(r, \varphi, z) \\ B_z(r, \varphi + \Delta\varphi, -z) = B_z(r, \varphi, z) \end{cases} \quad (3-2)$$

式中 B_r , B_φ , B_z ——磁感应强度 B 在柱坐标系下的三个分量; r , φ , z 分别为任一坐标系下的分量; $\Delta\varphi$ 为一个极距角。

通过建模、剖分、加载、求解和后处理等一系列程序后,可以得到发电机电磁场。图 9 为用磁矢位有限元方法计算得到的电机空载磁场分布图。

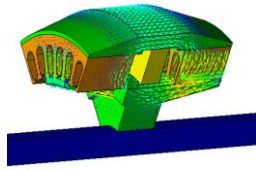


图 9 爪极发电机空载时磁场分布

Fig.9 no-load magnetic field of generator distribution

通过改变爪极发电机不同结构参数,然后计算发电机空载磁场,分析计算可以得到每极总磁通和每极有效磁通,于是就可以得到爪极发电机空载漏磁系数。

图 10 为定子内径对爪极发电机漏磁系数的影响。由图可知,随着定子内径的增大,即气隙逐渐增大,电机每极总磁通和有效磁通都有所减小,但漏磁系数却在增大。

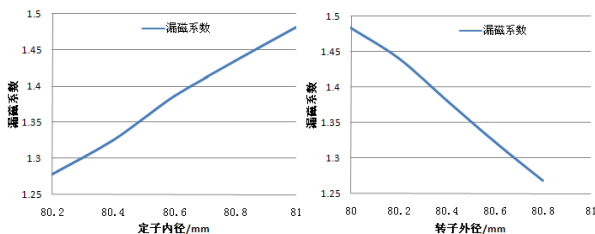


图 10 定子内径与漏磁系数曲线图 11 转子外径与漏磁系数曲线

Fig.10 stator inner diameter and magnetic flux leakage coefficient curve Fig.11 rotor outer diameter and magnetic flux leakage coefficient curve

图 11 为转子外径对爪极发电机漏磁系数的影响。由图可知,随着转子外径的增大,即气隙逐渐减小,电机每极总磁通和有效磁通都有所增加,但漏磁系数却在减小。

图 12 为爪极根部厚度对爪极发电机漏磁系数的影响。由图可知,随着爪极根部厚度的增加,电机每极总磁通和有效磁通都有所增加,但是漏磁系数基本保持不变。

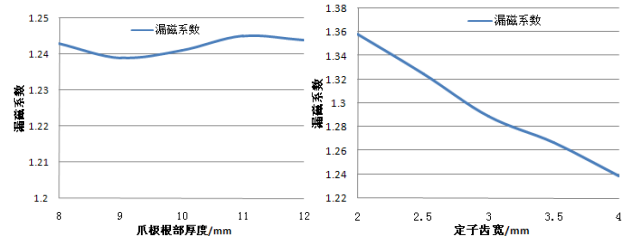


图 12 爪极根部厚度与漏磁系数曲线 图 13 定子齿宽与漏磁系数曲线

Fig.12 root thickness and magnetic flux leakage coefficient curve

Fig.13 stator tooth width and magnetic flux leakage coefficient curve

图 13 为定子齿宽对爪极发电机漏磁系数的影响。由图可知,随着定子齿宽的增大,电机每极总磁通和有效磁通都有所增加,但漏磁系数却在减小。

图 14 为定子铁心有效长度对爪极发电机漏磁系数的影响。由图可知,随着定子铁心有效长度的增大,电机每极总磁通和有效磁通都有所增加,但漏磁系数却在减小。

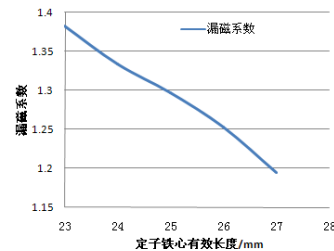


图 14 定子铁心有效长度与漏磁系数曲线

Fig.14 stator core length and magnetic flux leakage coefficient curve

综合图 10~14,由漏磁系数的变化可以得出一般规律,即电机漏磁系数相对定子内径呈正增长,相对转子外径、定子齿宽和定子铁心有效长度呈负增长,爪极根部厚度对漏磁系数基本无影响。上述规律对于爪极发电机的结构设计、电磁场计算以及优化爪极发电机结构参数等提供一定的理论基础,具有理论参考价值。

4 发电机空载特性和负载调节特性

发电机空载特性和负载调节特性分别如图 15、16 所示

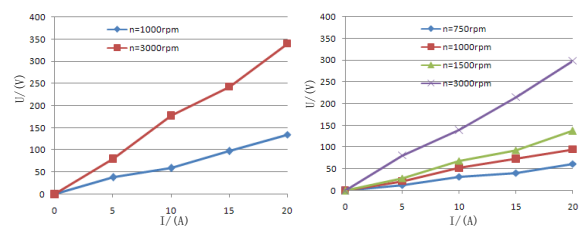


图 15 不同转速空载特性

图 16 负载调节特性

Fig.15 no-load characteristics Fig.16 regulation characteristics

通过对该发电机空载特性和负载调节特性的数值模拟,验证了该电机设计符合技术要求。在汽车传动轴转速 $n=1000\text{rpm}$,励磁电流 $I=20\text{A}$ 时,直流输出电压 $U \geq 100\text{V}$,满足缓速器工作要求。

5 结论

1) 通过对爪极发电机内部磁场、磁路的分析,验证了该发电机设计方案的可行性。

2) 采用三维有限元方法对爪极发电机的磁场进行了三维磁场仿真计算分析,研究了该电机空载和负载时的气隙磁场,反映了电枢反应对发电机的去磁作用。

3) 通过对该电机漏磁分析和相关结构参数的优化,绘制出了电机结构参数与漏磁系数的关系曲线图,得出了一般规律,即该电机漏磁系数相对定子内径呈正增长,相对转子外径、定子齿宽和定子铁心有效长度呈负增长,爪极根部厚度对漏磁系数影响不大。

4) 仿真结果表明,该电机设计符合技术要求,直流输出电压 $U \geq 100\text{V}$,符合前部分理论分析,满足缓速器使用要求,证明该设计可行性。

参考文献:

- 1 叶乐志,李德胜,王跃宗,等.先进汽车缓速器理论与实验[M].北京:机械工业出版社,2012.11:134-155.
YE Le-zhi,LI De-sheng,WANG Yue-zong,etal. Theory and Experiment of Advanced Automotive Retarder[M]. Beijing:China Machine Press,2012.11:134-155.(in Chinese)
- 2 李德胜,叶乐志.一种无电刷构造的液冷自励式电涡流缓速器[P].2011-07-12.
Li De-sheng,YE Le-zhi. A Brushless Self-excited Structure of Liquid-cooled Eddy Current Retarder[P].2011-07-12.(in Chinese)
- 3 倪有源.汽车用爪极发电机的分析与研究[D].合肥工业大学,2006.
NI You-yuan. Analysis and Research of Claw-pole Alternators for Automotive Applications[D].Hefei University of Technology,2006.(in Chinese)
- 4 汤蕴璆,罗应力,梁艳萍.电机学[M].北京:机械工业出版社,2008:88-91.
TANG Yun-qiu ,LUO Ying-li ,LIANG Yan-ping. Electrical Motor[M].Beijing:China Machine Press,2008:88-91.(in Chinese)
- 5 陈妮,陈传淼.爪极发电机漏磁的有限元分析[J].工程数学学报,2004,21(1):1-6.
Chen Wei, Chen Chuan-miao. The Claw-pole Alternator finite element magnetic flux leakage analysis [J]. Journal of engineering mathematics, 2004, 21 (1): 1-6.(in Chinese)
- 6 朱卫国,倪有源,王群京.用有限元方法分析计算爪极发电机空载漏磁[J].农业机械学报,2007,38(11):207-210.
Zhu Wei-guo, Ni You-yuan, Wang Qun-jing. Calculation of Claw-pole generator no-load leakage [J]. Journal of agricultural machinery are analyzed with the finite element method, 2007,38 (11): 207~210.(in Chinese)