

文章编号:1005-4642(2020)07-0035-04

基于电晕放电原理研究电机的转动性能

桂永杰^a, 孙丽媛^b, 马 佳^b, 于文革^b

(沈阳航空航天大学 a. 计算机学院; b. 理学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 基于转子与定子之间受力分析研究不同参量对电机转动性能的影响. 分析定子加上高压电后其尖端附近的电荷和电场的变化; 根据极间电场的分布, 分析电荷在定子和转子之间的运动规律; 当电荷漂移运动进行到一定时间后, 定子和转子之间产生扭矩驱动转子的转动; 再基于库仑定律对转子和定子之间的受力进行计算, 并就电离子风对转子转动产生的影响进行理论分析. 通过改变转子和定子之间的几何参数以及转子表面的导体材料, 分别研究了其对转子转速的快慢和转动的稳定性的影响.

关键词: 电晕放电; 电机; 转动稳定性; 库仑定律

中图分类号: TM301.2

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.07.008

18 世纪以来, 电磁学理论得到了长足的发展和广泛的应用, 如电磁炮^[1]、微电磁继电器^[2]、微电磁光开关^[3]等, 其中应用最广泛的莫过于电机. 鉴于新的知识和现代技术的涌现, 需要对诸如微型热交换器、恒温器、发动机、泵等复杂的元件和设备进行实体化和开发, 小型电机的模型开发与设计要求十分迫切. 小型电机可以在封闭体积以及压力和温度变化的特定情况下找到各种应用. 基于转子的电偶极矩与外部电场之间的相互作用原理, 电偶极电荷从产生到电晕放电形成电晕电流, 根据这个特性, 该电机被称为电晕放电发动机^[4]. 尽管目前有很多关于静电发动机的专利, 但研究人员认识到, 有关发动机转子旋转及其与“定子”相互作用的数据尚不足以支撑电晕电机在该领域迅速发展^[5]. 在以往的研究中, 已经考虑了静电引擎的不同构造, 在电子和热能转换为机械能的热力学的背景下, 静电发动机的运行与理想的卡诺热机的工作进行了比较^[6]. 静电引擎性能的机制目前尚未得到完整的分析描述, Mazen Abdel-Salam^[7]发现运动电荷电场中的物体旋转现象. 在向电极输送 25~35 kV 电压时, 形成了“电风”的运动粒子流. 已经研究了静电发动机的物理模型, 称为电晕放电发动机(CDE), 其工作原

理是基于电晕放电现象而不是基于电风.

1 电机转动原理

电晕放电的形成机制因尖端电极的极性不同而有区别, 这主要是由于电晕放电时空间电荷的积累和分布状况不同所造成的^[8-9]. 在直流电压作用下, 负极性电晕或正极性电晕均在尖端电极附近聚集起空间电荷. 在负极性电晕中, 当电子引起碰撞电离后, 电子被驱往远离尖端电极的空间并形成负离子在靠近电极表面则聚集起正离子. 电场继续加强时, 正离子被吸进电极, 此时出现脉冲电晕电流, 负离子扩散到间隙空间. 此后又重复开始电离及带电粒子运动过程. 如此循环, 以致出现许多脉冲形式的电晕电流. 若电压继续升高电晕电流的脉冲频率增加、幅值增大, 转变为负辉光放电^[10]. 正极性电晕在尖端电极附近也分布着正离子, 但不断被推斥向间隙空间, 而电子则被吸进电极形成重复脉冲式电晕电流^[11].

电晕电机的构成如下: 转子(发动机的主要部件)是直径为 40 mm 的薄壁介质圆柱体, 长度为 90 mm, 总质量为 10.5 g. 沿着柱体母线方向间隔均匀地贴上金属铝箔, 每一片铝箔之间的间隙保持相等. 电极是一端尖锐的铜制的钉子, 沿直

收稿日期: 2020-02-19; 修改日期: 2020-03-05

基金项目: 沈阳航空航天大学 2019 年大学生创新创业训练计划项目(No. 201910143284)

作者简介: 桂永杰(1998-), 男, 江西宜春人, 沈阳航空航天大学计算机学院 2017 级本科生.

通信作者: 孙丽媛(1963-), 女, 辽宁沈阳人, 沈阳航空航天大学理学院教授, 学士, 研究方向为应用物理. E-mail: sunliyuan2458@sau.edu.cn



径方向彼此相对并平行于柱体的母线, 2 个电极尖端面向圆柱体表面, 它们在直径上彼此相对并平行于圆柱体的母线.

电晕电机由提供双极性对称电晕放电的高压电源供电. 负电极尖端负电位梯度足够大时, 在电极周围产生电离域. 在电离域中, 和电极电性相同的电荷被向外排斥, 相异的电荷则被电极吸引, 电荷在电离域内受电场作用做定向移动, 产生电晕电流^[12]. 被排斥的电荷向外运动, 逐渐沉积在转子上, 转子和电极的电性相同, 受到静电力产生的转动转矩, 开始转动. 除了静电力产生的力矩外, 电离子风也会对转子转动产生影响^[13]. 电风通常发生在尖端电极附近, 在电晕马达中, 若电极带正电, 电极附近空气被电离, 负离子及电子被吸向电极并被中和, 正离子则在电场力作用下背离电极而激烈运动, 拥有极高的速度. 当电极离转子距离足够近时, 这些正离子撞击转子表面, 会给转子平行于电极的正向冲力, 转子受到此冲力在 2 个电极之间做左右摇晃. 电风对转子转动的切向力做出一定贡献, 但当电极数量少且电极之间的距离较远时, 电风主要会给转子带来垂直于转子表面的正向冲力, 而对切向力的贡献相对较少, 与总静电力产生的切向力相比几乎可以忽略不计^[14].

Q_1 和 Q_3 分别为正电极尖端和负电极尖端所带的电荷量, Q_2 和 Q_4 分别为靠近负电极和正电极尖端的导体所带电荷量. 由于铝箔导体的形状近似为矩形, 其长度为 L , 宽度为 W , 采用微元法对铝箔导体进行分析, dq 表示铝箔导体上的微元电荷. 由于铝箔是导体, 其表面电荷分布均匀, 设其面电荷密度为 σ , 则

$$\begin{cases} dq = \sigma ds, \\ \sigma = \frac{Q}{LW}, \\ ds = da db. \end{cases} \quad (1)$$

据此可以得出 $dq = \frac{Q}{LW} da db$, R 表示微元电荷到电极尖端的距离, $R = f(a, b)$. 导体部分和电极之间产生的力水平力 F_1 为

$$F_1 = \int_{Q_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{R_1^2} dq e_r + \int_{Q_4} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_3}{R_2^2} dq e_r, \quad (2)$$

化简后可得到

$$F_1 = \frac{Q_1 Q_2 \iint_s \frac{da db}{R_1^2} e_r + Q_3 Q_4 \iint_s \frac{da db}{R_2^2} e_r}{4\pi\epsilon_0 LW}, \quad (3)$$

由于绝缘体表面电荷不能自由移动, 其表面电荷分布情况未知. 采用微元法对绝缘体表面的电荷和电极进行受力分析. 导体部分和电极之间产生的力 F_2 为

$$F_2 = \int_{Q_2'} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{R_3^2} dq e_r + \int_{Q_4'} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_3}{R_4^2} dq e_r, \quad (4)$$

化简后可得到

$$F_2 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0} \int_{Q_2'} \frac{dq}{R_3^2} e_r + \frac{Q_3}{4\pi\epsilon_0} \int_{Q_4'} \frac{dq}{R_4^2} e_r. \quad (5)$$

其中, Q_2' 和 Q_4' 分别为靠近负电极和正电极尖端的绝缘体所带电荷量.

根据转子表面导体部分受力和非导体部分受力的分析, 得出导体部分受力为 F_1 , 非导体部分受力为 F_2 . 所以, 转子所受到的合力 F 为

$$F = F_1 + F_2, \quad (6)$$

将 F 与转子相切且平行转子横截面的分力 $F_{//}$, 由此可得转子转动的扭矩为

$$T = M = F_{//} gr. \quad (7)$$

2 实 验

根据电晕马达的原理和影响转速的因素, 由确定影响转子转速的因素: 输入电压、电极和转子的距离、转子上的导体涂层^[15]、电极和转子的相对位置及电极数量. 在实验中, 发现电极和转子靠得太近时, 产生电火花放电, 伴随有电火花和爆裂声, 离太远时, 转子转动很慢或基本不转动, 其他参量对转子转动产生的影响也与之类似.

将电压固定为 20 kV, 探究在固定电压下其他因素对转子转速的影响.

2.1 电极和转子的距离

如图 1 所示, 电极数量为 2 个, 高度位于转子中部, 铝箔平均间距为 1.5 cm, 数量为 3 片, 电极位置的连线过转轴中心.

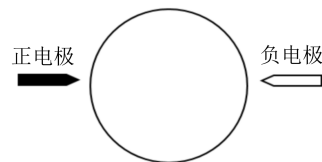


图 1 2 个电极的位置

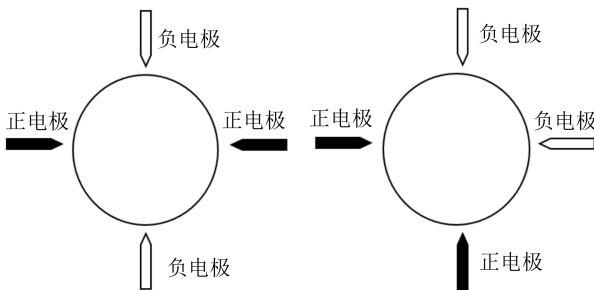
实验数据如表 1 所示. 实验结果显示, 在不产生电火花的情况下, 转子转速随电极和转子的距离增大而减小.

表 1 不同转子距离和对应的转速

| d/mm | $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | d/mm | $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ |
|---------------|--------------------------------------|---------------|--------------------------------------|
| 7 | 457.5 | 16 | 168 |
| 10 | 280 | 19 | 114 |
| 13 | 230 | | |

2.2 电极数量

电极数量为 4,高度位于转子中部,铝箔数量为 3 片、相邻铝箔间距相等的情况下,改变测量电极和转子的距离和电极位置. 当有 4 个电极时,电极的位置会对转子转动产生较大的影响. 为此,用 2 种电极位置时测量转子的稳定转速(图 2).



(a)正负电极相对 (b)正负电极相邻
图 2 4 个电极位置

实验中电极位置若按正负电极相对方式摆放,在电极上加上高压电时,转子转动状态不稳定,以至于无法正常转动;按照正负电极相邻的摆放位置时,转子能够稳定转动. 实验数据见表 2.

表 2 正负电极相邻时,电极和转子距离对应的转速

| d/mm | $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ |
|---------------|--------------------------------------|
| 13 | 75.0 |
| 16 | 367.2 |
| 19 | 136.8 |

电极的相对位置会对电极产生很大的影响,正负电极相对时,转子往往不转动或者转动极不稳定;正负电极相邻时,转子在电极和转子的距离大于高压电产生的电位梯度范围一段距离时,才能稳定转动.

2.3 导体涂层

电极数量为 2 个,高度位于转子中部,定子和转子的距离为 7 mm,在相邻铝箔间距相同时,测量铝箔数量为 1 片、2 片和 3 片时的转子转速. 实验数据如表 3 所示.

表 3 不同导体涂层对应的转速

| 铝箔数量 | $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ |
|------|--------------------------------------|
| 1 | 310.0 |
| 2 | 441.6 |
| 3 | 457.5 |

实验结果显示,转子转速随铝箔数量的增大而增大,随间距的增大而减小.

2.4 电极位置

电极数量为 2 个,定子和转子的距离为 7 mm,铝箔数量为 3 片,平均间距为 1.5 cm,测量电极高度为转子顶部、中部、底部时的转子转速. 电极位置如图 3 所示,实验数据如表 4 所示.

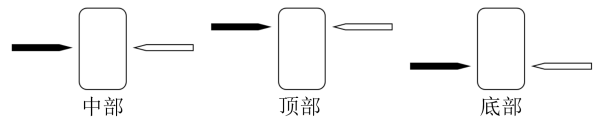


图 3 电极的 3 个位置

表 4 不同电极位置对应的转速

| 电极相对高度 | $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ |
|--------|--------------------------------------|
| 顶部 | 311.0 |
| 中部 | 457.5 |
| 底部 | 216.0 |

实验结果表明:电极高度在转子中部时,转子才能稳定转动;位于顶部时,转子转动不稳定;位于底部时,转子能够稳定转动但转动速度较慢.

3 结 论

通过实验和理论分析,确定了 5 个影响电晕电机转子转速的参量,即输入电压大小、电极和转子的距离、转子上的导体涂层、电极和转子的相对位置、电极数量. 实验得出的各参量的变化情况和理论分析中得出的结论一致. 在不产生电火花的情况下,转子转速随电极和转子的距离增大而减小;转子转速随铝箔数量的增大而增大,间距的增大而减小;电极数量为 4 时,电极的相对位置会对电极产生很大的影响,正负电极相对时,转子往往不转动或者转动极不稳定;正负电极相邻时,转子在电极和转子的距离大于高压电产生的电位梯度范围一段距离时,才能稳定转动,造成这种现象的原因是电极数量越多,电场对转子转动的影响就越大,电场分布越复杂,电极之间的电场干扰就

越严重;电极高度在转子中部时,转子才能稳定转动,位于顶部时,转子转动不稳定,位于底部时,转子能够稳定转动但转动速度较慢.

参考文献:

- [1] 苏祥华,罗积军,候素霞,等. 电磁炮演示仪的制作[J]. 物理实验,2017,37(2):54-56.
- [2] 吴雅苹,陈晓航,吴志明. 基于有限元模拟与数值计算的微电磁继电器结构设计与性质研究[J]. 物理实验,2018,38(8):9-12.
- [3] 吴雅苹,陈晓航,吴志明. 微电磁光开关的结构设计与性质模拟[J]. 物理实验,2019,39(9):10-14.
- [4] Bologa M K, Grosu F P, Shkilev V D, et al. A corona-discharge dipole engine [J]. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2015,51(4):401-405.
- [5] Lee S, Kim D, Bryant M D, et al. A micro corona motor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005,118(2):226-232.
- [6] van Wyk J D N, Kühn G J. A novel electrostatic Machine: the Corona Motor [J]. Nature, 1961,192(4803):649-650.
- [7] Abdel-Salam M, Ahmed A, Ziedan H, et al. Analysis of corona discharge in electrostatic motor gaps [J]. Journal of Engineering Sciences, 2013,41(5):1842-1856.
- [8] Lee S, Kim D, Jin Y, et al. A Micro corona motor fabricated by a SU-8 built-on X-ray mask [J]. Microsystem Technologies, 2004,10(6/7):522-526.
- [9] Hattori M, Asano K, Higashiyama Y. The fundamental characteristics of a cylindrical corona motor with multi-blade electrodes [J]. Journal of Electrostatics, 1992,27(3):223-235.
- [10] Chang J S, Lawless P A, Yamamoto T. Corona discharge processes [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1991,19(6):1152-1166.
- [11] Robinson M. Movement of air in the electric wind of the corona discharge [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, 1961,80(2):143-150.
- [12] Lindner M, Elstein S, Lindner P, et al. Daylight corona discharge imager[C]//High voltage engineering symposium. London: 11th International Symposium on High Voltage Engineering, 1999: 22-274.
- [13] Gabriel K J, Prud'homme R K, Trimmer W S N. Micro-electrostatic motor. U. S., Patent 4,754,185 [P]. 1988-6-28.
- [14] King R J. Corona discharge apparatus. U. S., Patent 5,317,155 [P]. 1994-5-31.
- [15] Goldman M, Goldman A, Sigmond R S. The corona discharge, its properties and specific uses [J]. Pure and Applied Chemistry, 1985,57(9):1353-1362.

Rotation performance of motor based on corona discharge principle

GUI Yong-jie^a, SUN Li-yuan^b, MA Ja^b, YU Wen-ge^b

(a. School of Computer Science; b. School of Science,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Based on the analysis of the force between the rotor and the stator, the effect of different parameters on the rotating performance of the motor was studied. First, the change of the charge and electric field near the tip of the stator under high voltage was analyzed. Then, according to the distribution of the electric field between the poles, the motion of the charge between the stator and the rotor was analyzed. After a certain time of charge drifting, a torque would be generated between the stator and the rotor to drive the rotation of the rotor. Then, the force between the rotor and the stator would be calculated based on the Coulomb law, and the effect of ionized wind on the rotation of the rotor would be analyzed theoretically. By changing the geometric parameters between the rotor and the stator and the conductive material on the surface of the rotor, the effects on the speed of the rotor and the stability of the rotation were studied, respectively.

Key words: corona discharge; motor; rotational stability; Coulomb law [责任编辑:郭 伟]