

文章编号: 100028055(2010) 062139206

电飘机升力机制和效率的研究

任军学¹, 刘 宇¹, 江兴流², 乐晓云², 王立英²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学 物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

摘 要: 实验测量了电飘机在不同电压和电极几何参数情况下的升力值. 采用离子风现象解释了电飘机的升力机制, 在此基础上利用一维电流体动力学方法推导了升力和升力效率的公式. 理论分析结果和实验值吻合良好, 电飘机中升力的来源依赖于电晕电流的形成, 并与电晕电流的大小相关. 在电压不太高时, 升力大小随电压的升高而增大, 并大致呈抛物线关系, 与电极间距成反比关系, 与电极长度成正比关系. 分析了空气参数对电飘机升力和效率的影响, 发现减小离子在空气中的迁移率是提高效率的有效方法, 但同时降低了升力. 分析了电飘机的应用前景.

关 键 词: 电飘机; 电晕放电; 离子风; 电流体动力学; 推进装置

中图分类号: V439; O571.44 **文献标识码:** A

Investigation of the lifter's lift mechanism and efficiency

REN Junxue¹, LIU Yu¹, JIANG Xingliu², LE Xiaoyun², WANG Liding²

(1. School of Astronautics,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. School of Physics and Nuclear Energy Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The lift force of the lifter were measured with different voltage and geometry between electrodes. The ionic wind explanation of the lifter's flying was given and the formulas of the lifter's lift and efficiency was deduced based on it with an one dimensional electrohydrodynamic (EHD) method. The theoretical results agree with the present experimental results. The lift force generation and its magnitude depends on the corona discharge current. When the voltage between the electrodes is not very high, the magnitude of the lift force is parabolic to the voltage, proportional to the distance between the electrodes, and inverse proportional to the length of the electrodes. The influence of the parameters on the lift force and efficiency of the lifter was analysed according to the theoretical formulas. The lifter's efficiency can be improved by reducing the ion drift velocity while the lift force is reduced. The lifter's performance is compared with that of the present propulsion systems and it indicates the lifter's thrust power ratio is greater while its efficiency and thrust weight ratio is smaller. Thus the lifter can be only developed as an auxiliary aviation propulsion system.

Key words: lifter; corona discharge; ionic wind; electrohydrodynamic; propulsion device

近年来,一种叫电飘机(lifter)的装置引起了国内外研究机构的兴趣,并设想能够发展成为一种航空或空间推进装置^[25].图1为典型的电飘机的结构,主要由细铜线、铝箔和轻木条组成.铜线、铝箔分别作为电极的两极,轻木条作为结构支撑件.在电极上加合适的电压(一般为几十千伏),便产生一种上升的力,当这种力超过装置的结构(不包括电源)质量时,便可以飘升起来.这个现象最先由 Biefeld P 和 Brown T T 发现,所以也叫 Biefeld2Brown 效应^[1].

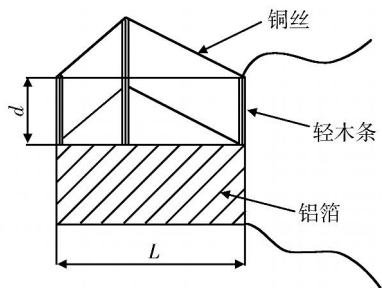


图1 典型电飘机的构成

Fig. 1 Typical configuration of the lifter

关于电飘机升力的来源,国内外研究有一定的争议,比较有代表性的几种解释是:反引力^[3];电子漂移^[4];涡旋动力学^[5];离子风^[28]等,但主要观点还是离子风的解释.离子风以外的几种解释的物理过程尚不清晰,且不能定量地计算升力的大小.Tajmar 设计了一个实验,在一个悬吊的封闭盒子里,对电飘机施加高电压时,测量盒子振荡振幅是否为对称来判断是否有额外的力产生,结果发现盒子振荡振幅是对称的,表明在封闭系统中电飘机没有额外的力产生^[6]. Talley 在真空条件下对电飘机并没有测得升力^[7]. Christenson 等人测量了电飘机产生的升力效率(获得的离子风动能与消耗的电能之比)大致为1%左右^[8].这些研究都直接或间接证实了离子风的解释,否定了其他的几种解释.本文在文献[8]的基础上进一步推导了电飘机的升力和效率公式,理论上解释了电极电压及几何参数等对升力和效率的影响,并得到了实验的验证.

1 实验过程和现象

实验采用了如图1所示三角形丝箔平行共面电极结构的电飘机.通过改变丝(箔)电极的长度 L 和极间距 d 来测量升力.实验中丝(箔)电极的长度 L 分别选取3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 cm 七个数值,分别制作出七个实验模型.模型中铝箔极的高

度为4 cm,厚度均为0.01 mm,丝极直径为0.09 mm,电极间距 d 在3~10 cm之间改变.

实验中丝极接0~50 kV 负的直流高压,箔极接地.采用JD400022 型号电子秤测电飘机的升力,精确到0.01 g.将电子秤外壳用铝箔纸屏蔽,经测试将电子秤空载置于高电压场中,对电子秤读数无影响,丝箔电极在施加电压绝对值低于30 kV 时,电子秤读数稳定.

由于制作的电飘机质量较大,施加高电压后,并未使电飘机完全脱离电子秤的支撑,但电子秤读数变小,表明产生了升力.实验中还发现,电飘机在飘升时丝电极有嗡嗡的声音,有时伴有臭氧的产生.这些现象表明,电飘机在飘升时丝电极发生了电晕放电.电晕放电时会产生离子风效应,已被众多实验所证实^[210].

2 解释及升力公式推导

离子风是电晕放电过程中特有的现象,也称电晕风,是放电过程电子雪崩引起的高速离子射流流动,这种离子射流对气流流动会产生强烈的扰动,形成二次流动^[210].以负极性电晕为例,当给丝电极施加负的直流高电压时,丝电极附近的高强电场使其周围的空气分子电离,形成的负离子一方面在丝电极附近累积,形成空间电荷,另一方面也会在丝电极与铝箔电极形成的电场作用下向铝箔电极运动.由于在大气压下的电晕放电属于高气压放电,产生的离子数密度小,会同中性空气分子发生频繁的碰撞,这种碰撞一方面使离子将向下的部分动量传给空气分子,驱使空气向下运动,从而产生推力使得电飘机飘升.同时由于离子与空气分子发生碰撞,同时使得离子的动能转化为空气分子的热能,大大降低了电飘机的效率.基于上述分析,认为升力为离子风向向下流动的结果,对其升力和升力效率进行推导.

为便于分析,只分析图1中电飘机中三对电极中的一对,将离子风简化为一维的流动.采用电流体动力学(EHD)的方法对电飘机升力及其效率进行推导.参见图2,假设:¹ 由于流动的速度非常低,所以假设离子风流动是定常不可压缩的;² 由于离子风是由静电场驱动的,所以假设流体刚进入控制体时,轴向(x 方向,原点在丝电极)速度为零,电场强度对空气的介电常数的影响可以忽略;³ 控制体区域内压强梯度 $dp/dx \ll \rho U^2$; ⁴ 控制体区域内电场强度 E 、电流密度 j 以及空气速度 u 只有在轴线方向上的分量,电流密度 j 是

常数; $\frac{1}{2}$ 电场强度 E 在接近丝电极表面处为零^[11]; $\frac{3}{4}$ 离子风相当于源自丝极的射流^[9], 射流在铝箔电极处的流动截面积与电极长度 L 、电极间距 d 有关, 即 $A = 2Ld \tan H$, H 为射流角, 可由实验结果确定. 本实验中的结果表明, H 取 $10b$.

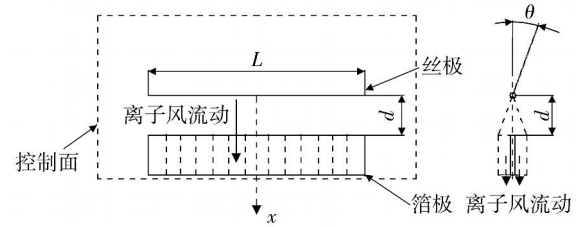


图 2 电飘机理论分析

Fig. 2 Theory analysis of lifter

对于常黏性不可压缩流体, 在电场力 QE_m 的作用下, 流体动量方程可写成如下形式:

$$\begin{aligned} Q5u_m/5t + u_n(5u_m/5x_n) = \\ - 5p/5x_m + L5^2u_m + QE_m \\ m, n = 1, 2, 3 \end{aligned} \tag{1}$$

其中 Q 为电荷密度, E_m 为电场强度.

在控制体上对上述方程进行积分

$$\begin{aligned} \oint_{\text{控制面}} k_s u_m n dS_n + Q \frac{5}{5t} m u_m dv = \\ - \oint_{\text{控制面}} k_s p dS_m + \oint_{\text{控制面}} k_s \frac{5u_m}{5x_n} dS_n + \oint_{\text{控制面}} m QE_m dv \\ m, n = 1, 2, 3 \end{aligned} \tag{2}$$

应用假设条件, 并注意本分析中黏性项可忽略, 式(2)变为

$$Q u^2 A = m QE_1 dv \tag{3}$$

由于横向方向上电场的梯度同轴向相比, 可忽略, 则 Poisson 方程可写为

$$dE_1/dx_1 = Q/E \tag{4}$$

将式(4)带入式(3)并积分, 根据假设 $\frac{3}{4} E(x_1 U 0) = 0$ 并省略下标, 得

$$Q u^2 = (E/2) E_1^2 \tag{5}$$

其中 E_L 为箔电极处的场强. 电流密度为

$$j = Q(E + u) \tag{6}$$

其中 b 为氮离子在空气中的迁移率. 常温常压下, 氮离子 $b = 2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.

由式(4)和式(6), 并积分, 得

$$E = - (u/b) + [(u/b)^2 + (2j/Eb)x]^{1/2} \tag{7}$$

对于 $x = d$ 处, 合并式(4)和式(6), 可得箔电极处离子风的速度

$$u = \left\{ j d / [Qb / (1 + \epsilon)] \right\}^{1/2} \tag{8}$$

以上各式中 ϵ 由空气介电常数 E 、空气密度 Q 以及 b 组成, $\epsilon = \left[\frac{2E}{Qb} \right]^{1/2}$.

注意到 $E = - dU/dx$, 代入到式(7)并积分, 得到电流密度

$$j = \frac{2(U_L - U_0)^2}{d^3} \frac{Eb(1 + \epsilon)}{\{1 + 1/[3(1 + \epsilon)]\}^2} \tag{9}$$

一般来讲, 电晕放电电流与电压关系式为 $I = V_0(V_0 - V_s)B$, (V_0 为电极间的电压, V_s 为起晕电压, B 为由结构和流体性质决定的常数)^[12]. 它表明电流与 V_0 和 $V_0 - V_s$ 都有关. 这样式(9)改写为

$$j = \frac{2V_0(V_0 - V_s)}{d^3} \frac{Eb(1 + \epsilon)}{\{1 + 1/[3(1 + \epsilon)]\}^2} \tag{10}$$

利用式(10)改写式(8), 得到箔电极处离子风的速度

$$u = \frac{[V_0(V_0 - V_s)]^{1/2}}{d} b \frac{\epsilon}{1 + 1/[3(1 + \epsilon)]} \tag{11}$$

至此, 可以得到升力和升力效率的公式

$$\begin{aligned} F = Q u^2 A = \\ \frac{2Q^2 V_0(V_0 - V_s) L \tan H}{d} \left\{ \frac{\epsilon}{1 + 1/[3(1 + \epsilon)]} \right\}^2 \end{aligned} \tag{12}$$

$$G = \frac{\frac{1}{2} Q u^2 A}{V_0 j A} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_0 - V_s}{V_0} \right)^{1/2} \frac{1}{1 + \frac{4}{3\epsilon}} \tag{13}$$

讨论: 从升力公式可以看出, 升力的大小与离子在空气中的迁移率 b 以及参数 ϵ 有关. 而 b 和 ϵ 仅与空气的性质有关, 因此影响空气介电常数 E 、密度 Q 和 b 的因素 (如大气压强, 空气湿度等) 都可以影响升力和升力效率. 这与文献[2]中发现的升力随大气气压和湿度的变化而变化是一致的. 同样, 升力效率非常依赖于参数 ϵ , 在地面附近, 对于空气 $\epsilon \approx 10^{-2}$. 当 $V_0 \approx V_s$, $G \approx 0.74\%$, 与文献[8]中的实验值 1% 比较接近.

根据升力和升力效率公式, 减小空气中离子的迁移率 b , 可以提高效率. 例如 b 减小两个数量级, 则升力效率可接近 30% , 但效率提高的同时升力也降低了. 文献[11]指出, 减小离子迁移率的一个方法是使用脉冲高压. 对于时间长度合适的脉冲, 离子在与中性原子碰撞时的速度同采用直流电压时要小, 附带产生的热损失也会小得多, 从而提高了升力效率.

3 实验验证和分析

图 3 为实验测得的电极电压与升力关系的典型曲线,此时电极长度为 12 cm,电极间距 3~10 cm 变化。可以看出,只有当电压高于起晕电压(图中为-7.5~-10 kV)时,即形成了电晕电流,电飘机才开始产生升力,升力公式也反映了这一点。电压不太高时(低于-20 V 但高于起晕电压),升力大小随电压的升高而增大,并大致呈抛物线关系。图 4 的结果更进一步证实了这一点。从升力公式的推导过程来看,此时,电晕放电电流大小也是与电压成抛物线关系的。在两电极间距较小的情况下,电压升高到一定的程度后升力会消失。此时电极间发生了电弧放电而短路,即电晕电流消失,从而导致升力消失。当电飘机两电极间距较大,施加高的电压时升力不再增加而基本保持不变,因为此时电极间的电晕电流达到了饱和,不再随电压的增加而变大,从而升力也基本保

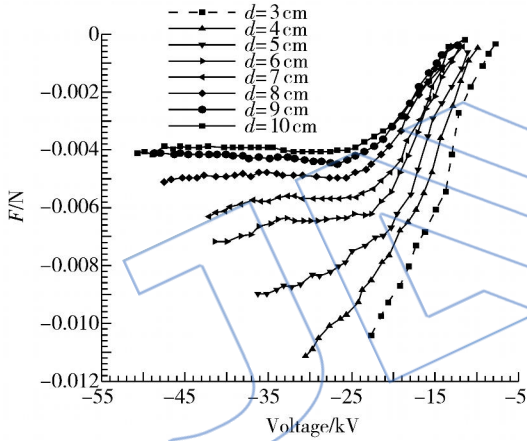


图 3 电压与升力关系的典型曲线

Fig. 3 Typical curve of voltage vs lift force

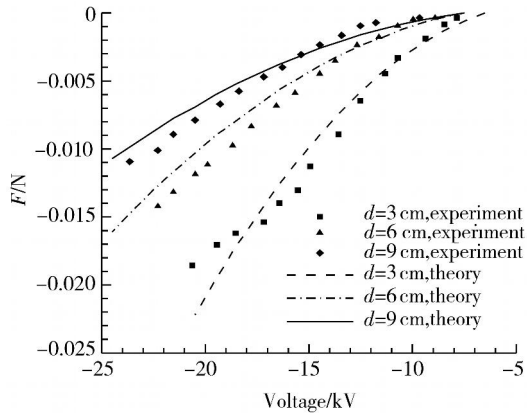


图 4 不同电极间距下升力与电压的关系

Fig. 4 Lift force vs voltage with different distances between electrodes

持不变。以上分析表明,升力的来源依赖于电晕电流的形成,并与电晕电流的大小相关。

图 4 至图 6 给出了电压不太高(对应于图 3 中的第 9 种情况)时,升力与电极电压值和几何参数间关系的理论值和实验结果的对比。图 4 为电极长度 $L=21$ cm,电极间距 d 分别从 3, 6, 9 cm 时,电飘机升力与电压间的关系。电压的范围为 -20 V 至 -5 V。可以看出,升力大小与电压大致成抛物线关系,理论值和实验值吻合得较好。这同样因为升力的来源依赖于电晕电流的形成,并且电晕放电电流大小与电压成抛物线关系决定的。

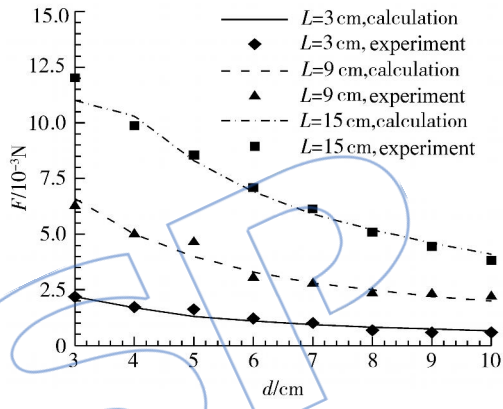


图 5 升力与电极间距的关系

Fig. 5 Lift force vs distance between electrodes

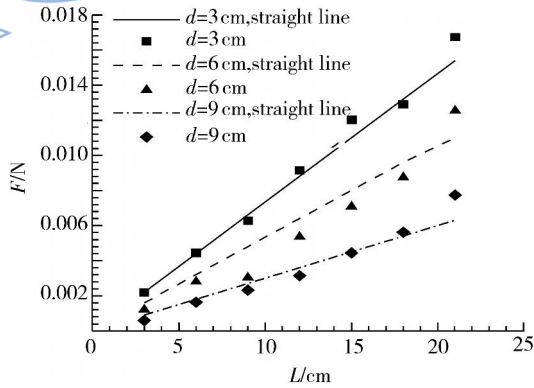


图 6 升力与电极长度的关系

Fig. 6 Lift force vs electrode length

图 5 为电极间电压为 20 kV 时,电飘机升力和电极间距的关系,可以看出升力大小与电极间距成反比关系,理论值和实验值吻合很好。随着电极间距的增大,在电压一定的情况下,尽管离子风的作用面积增大了,但箔电极处的离子风速度会下降,仍造成电飘机升力的下降。升力下降的幅度随间距增加越来越小,图 3 和图 4 中的曲线也反映了这一特点。反之,减小电极间距可以增加升力,但电极间距过小容易发生电弧放电短路使得

推力消失.

图 6 为电极间电压为 20 kV 时, 电飘机升力和电极长度的关系. 可以看出升力大小与电极长度成正比关系, 这与理论预测也是一致的. 此时箔电极处的离子风速度没有变化, 但增大了离子风的作用面积, 从而提高升力, 但单纯依靠增加电极长度增加推力来实现在飞行器上应用仍然远远不够, 因为这种措施并没有提高升力效率, 电飘机体积显得非常庞大. 例如, 文献[3]中制作的电飘机升力为 1.8 N, 直径已达到了 2 m.

对电极长度和间距均为 3 cm 的电飘机电荷密度、离子风的速度分布进行了计算. 从图 7 (a)可以看出, 丝电极附近的电荷密度最高, 然后电荷密度随着丝电极距离的增大迅速下降, 平坦区的电荷密度约 $2.2 \times 10^{-4} \text{ C/m}^3$ ($1.3 \times 10^9/\text{cm}^3$), 同空气的分子数密度($4.4 \times 10^{17}/\text{cm}^3$) 相比很小, 因此运动的离子会同空气中分子发生频繁碰撞, 形成离子风. 图 7 (b) 给出了有无空间电荷时电极间电势分布的对比, 由于丝电极附近聚集的大量空间电荷, 造成空间电场的畸变. 从图 7 (c)可以看出, 离子风的速度在箔电极处达到了 1.9 m/s , 这与文献[10]针2板式电极中测得的离子风速度的数量级是一致的. 正是这一速度的离子风使电飘机产生升力.

表 1 为电飘机同目前的推进系统性能比较的情况. 从应用的角度讲, 推质比是作为独立推进装置的重要的性能指标. 可以看出, 电飘机的升(推)力效率(此处推力效率定义为喷射物质获得的动能与推进装置消耗的能量之比)和推质比较低, 另外占据的体积也较大, 因此难以作为航空主推进装置, 但优势在于推力功率比(单位功率所产生的推力)较高, 可考虑其作为一种辅助动力装置(如控制系统的执行装置)进行发展.

表 1 几种不同推进装置的性能比较
Table 1 Comparison of different propulsion devices performance

推进系统	典型推力效率/%	推力功率比/(N/kW)	推质比
喷气式发动机	50	4.0	~ 10
化学火箭发动机 ^[12]	50	0.34	$10^{-2} \sim 100$
电弧加热发动机 ^[12]	50	0.17	$10^{-4} \sim 10^{-2}$
静电离子发动机 ^[12]	90	0.051	$10^{-6} \sim 10^{-4}$
核裂变发动机 ^[13]	50	0.13	$10^{-2} \sim 30$
电飘机 ^[5]	1	2.5	$10^{-5} \sim 10^{-4}$

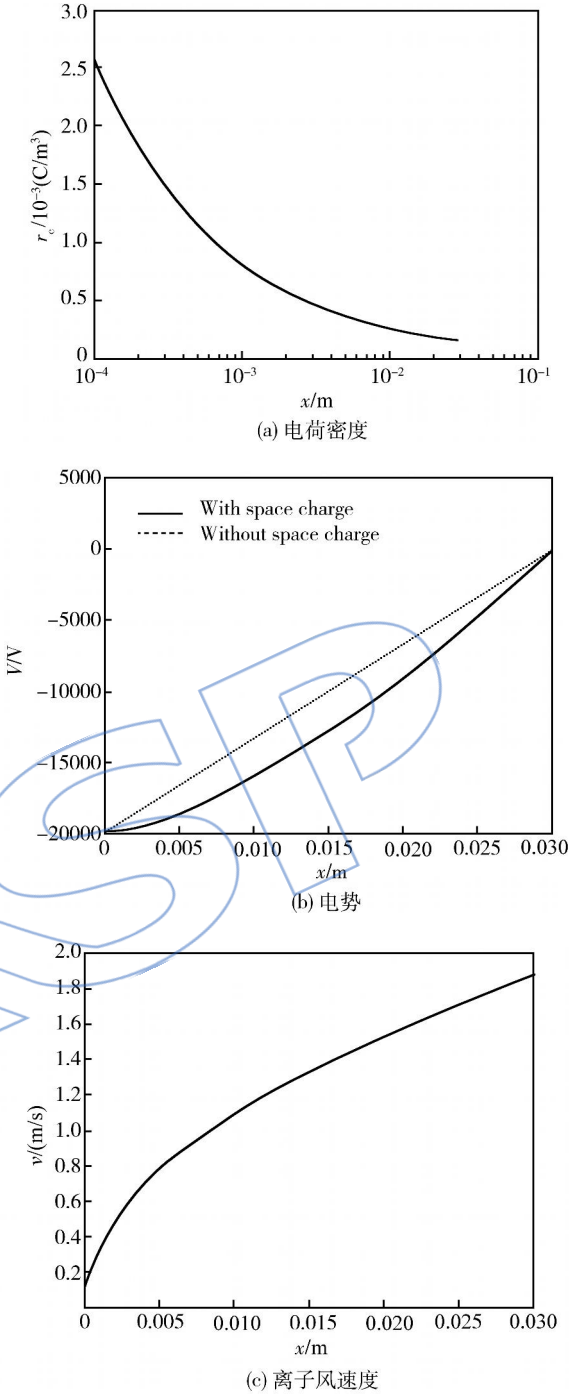


图 7 电极间参数的分布
Fig. 7 Parameter distribution between the electrodes of the lifter

4 结 论

1) 以离子风现象为基础推导的电飘机升力理论值和实验值十分吻合, 表明采用离子风理论解释电飘机飘升现象是合理的. 电晕放电产生的离子同空气中的分子频繁的碰撞, 形成离子风, 一方面使电飘机获得动量从而飘升, 但另一方面造成的能量损失使得其升力效率很低.

2) 电飘机中升力的来源依赖于电晕电流的形成, 并与电晕电流的大小相关. 在电压不太高时, 升力大小随电压的升高而增大, 并大致呈抛物线关系, 与电极间距成反比关系, 与电极长度成正比关系. 减小离子在空气中的漂移率, 可以有效提高升力效率, 但同时也降低了升力.

3) 目前典型的电飘升机升力效率只有 1% 左右, 推质比小, 占据的体积大, 因此难以发展为航空主推进装置, 但其优势是推力/ 功率比较大, 可考虑其作为一种辅助动力装置进行发展.

由于本文发展的离子风模型基于一维 EHD 理论, 在理论假设上有一定的局限性, 模型对离子风的流动描述也不够细致, 下一步可进行二维 EHD 理论计算. 在实验方面也主要测量的是升力等宏观参数, 对离子风的速度分布及周围流场的性质尚未测量, 可采用粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV) 系统对离子风流动图像进行细致的测量, 更好地认识电飘机的升力机制.

参考文献:

[1] Brown T T. A method of and an apparatus or machine for producing force or motion: GB, 300311[P]. 19281215.
[2] De Seversky A P. Ionocraft: US, 3130945[P]. 196404228.
[3] Musha T. The possibility of strong coupling between electricity and gravitation[J]. Infinite Energy, 2004, 10(1): 61264.
[4] Bahder T B, Fazi C. Force on an asymmetric capacitor[R]. Army Research Laboratory, Adelphi, MD 207831197, 2003.
[5] 江兴流, 易立志, 刘锐, 等. 电晕放电飘升机研究[J]. 航空学报, 2005, 26(6): 682685.

JIANG Xingliu, YI Lizhi, LIU Rui, et al. Study of the lifter based on Biefeld-Brown effect with corona discharge[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(6): 682685. (in Chinese)
[6] Tajmar M. Biefeld-Brown effect: misinterpretation of corona wind phenomena [J]. AIAA Journal, 2004, 42(2): 3152318.
[7] Talley R L. Twenty first century propulsion concept [R]. Report Prepared for the Phillips Laboratory, AID2A237853, 1990.
[8] Christenson E A, Moller P S. Ion-neutral propulsion in atmospheric media[J]. AIAA Journal, 1967, 5(10): 17621773.
[9] 亢燕铭, 荣美丽, 沈恒根, 等. 空气净化过程中的电晕放电与离子风[J]. 自然杂志, 2002, 24(3): 122129.
KANG Yanming, RONG Meili, SHEN Henggen, et al. Corona discharge and ionic wind in air cleaning processes[J]. Chinese Journal of Nature, 2002, 24(3): 122129. (in Chinese)
[10] 袁均祥, 邱炜, 郑程, 等. 空气放电离子风特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 1102116.
YUAN Junxiang, QIU Wei, ZHENG Cheng et al. Study on characteristics of ionic wind from atmosphere discharge [J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29(13): 1102116. (in Chinese)
[11] Amin M R. Fast time analysis of intermittent point-to-plane corona in air III: the negative point Trichel pulse corona[J]. Journal of Applied Physics, 1954, 25(5): 6272633.
[12] 罗思 J R. 工业等离子体工程 第 I 卷: 基本原理[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
[13] Sutton G P, Biblarz O. Rocket propulsion[M]. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.