

# 飞行摩擦电效应: 产生机理、安全防治与应用研究

程子熙 陈双 张佳辉 李垚磊 张凯勋

上海工程技术大学 航空运输学院

DOI:10.32629/pe.v3i6.18033

**[摘要]** 本文旨在科普飞机飞行过程中的摩擦电现象,揭示其产生机理、各类特点以及现阶段防治技术与未来应用方向。首先阐释飞机摩擦电的核心本质即电荷转移现象,介绍其产生条件及影响电荷量的变量;随后分析摩擦电的分布特点,明确其与飞机形状结构、外部环境及飞行阶段的关联;通过历史飞行事故指出摩擦电的潜伏危害,进而介绍现有预防措施及未来应用新技术。

**[关键词]** 飞行器; 摩擦电效应; 能量收集; 电荷转移; 自供电设备

**中图分类号:** U270.38+1 **文献标识码:** A

## Flight Triboelectric effect: Generation Mechanism, Safety Prevention and Control, and Application Research

Zixi Cheng Shuang Chen Jiahui Zhang Yaolei Li Kaixun Zhang

School of Air Transport, Shanghai University of Engineering Science

**[Abstract]** This paper aims to popularize the triboelectric phenomenon during aircraft flight, reveal its generation mechanism, various characteristics, as well as the current prevention and control technologies and future application directions. Firstly, explain the core essence of frictional electricity in aircraft, namely the phenomenon of charge transfer, and introduce its generation conditions and the variables that affect the amount of charge. Subsequently, analyze the distribution characteristics of triboelectricity to clarify its correlation with the shape and structure of the aircraft, the external environment and the flight stage; The latent hazards of triboelectricity are pointed out through historical flight accidents, and then the existing preventive measures and new technologies for future applications are introduced.

**[Key words]** Aircraft; triboelectric effect; energy harvesting; charge transfer; self-powered equipment

### 引言

静电是自然界中无处不在的物理现象,工业发展上静电常产生很多危害,主要来源于静电的累积和泄放。飞机沉积静电导致飞机表面电势可高达几十万伏,一旦大量沉积静电在局部区域发生放电现象,产生强辐射电场和宽频谱电磁干扰,影响飞机通信导航系统及机载设备的正常工作,严重时产生的剧烈放电现象,点燃飞机上易燃易爆物,产生不可估量的灾难。因此,飞机沉积静电的累积是飞机安全的潜在威胁,研究飞机沉积静电的分布特性是控制合理泄放提供理论依据。

#### 1 摩擦电的定义与存在根源

##### 1.1 什么是摩擦电

摩擦电(又称摩擦起电)是指两种不同物体通过直接接触和分离(如摩擦)引发的电荷转移,进而产生静电的物理现象,常见于绝缘体或绝缘体与导体之间。两个不同的物体只要有摩擦或接触分离,就会产生摩擦起电。在固体与固体之间、固体与液体之间,甚至固体与气体之间,都存在着摩擦起电。本质是接触界

面处的电荷重新分布,导致物体带电。

##### 1.2 摩擦电的存在根源

当飞机在空中高速飞行时,飞机的表面金属蒙皮与空间中的尘土颗粒、雨滴、冰晶颗粒以及其他物质粒子不断地发生接触、摩擦和分离等一系列过程而起电。在接触区域会发生电荷的转移,于接触界面处形成一个厚度约为2nm的偶电层。飞机蒙皮表面的原子与来流空气中的粒子碰撞并产生摩擦时,束缚力弱的物质(如冰晶)的电子会转移到束缚力强的物质(如铝制机身),导致前者带正电、后者带负电;摩擦迫使材料原子进入“排斥区域”,电子通过量子隧穿效应跨越势垒转移,形成静电荷,并在一符合特定条件的区域内富集。

#### 2 飞机飞行中的摩擦电产生机制

##### 2.1 飞机飞行中摩擦电的产生原因

飞机飞行时,空气中的尘埃、冰、雨、雪以及其他粒子与飞机表面碰撞、摩擦,电荷在接触点转移到飞机外表面,生成沉积静电(Precipitation Static)。此外,发动机的带电尾气以及飞

机穿越带电云层也会导致飞机带静电

## 2.2 摩擦电的产生条件

摩擦电产生需满足三条件：一是异质材料接触（机身与空气微粒），为电子转移奠定基础；二是粒子紧密接触与相对运动（高速摩擦提供动力）；三是表面粗糙与高空干燥环境（助力电荷积累）。

## 2.3 影响摩擦电大小的关键因素

摩擦电电荷量受六因素影响：一是气象条件，降水、云层粒子等与机身碰撞转移电荷，低湿度 (<40%) 及雷暴区强电场加速积累；二是机体材料，绝缘材料易滞留电荷，金属及导电涂层传导性好，表面越粗糙生成量越多；三是飞行速度，0.2-0.8马赫区间内，速度越高摩擦越强，电荷生成越多且向迎风面聚集；四是蒙皮特性，金属带负电，碳纤维等复合材料可能带正电；五是机翼曲率，凸导体表面曲率越大电荷密度越高，曲率变化剧烈则电荷集中，导体薄圆盘（曲率为0）无此对应关系。

## 3 飞机摩擦电的特性与分布规律

在飞机摩擦电中摩擦起电也就是沉积起电，所占的比重是最大的。一般在下雪或者下雨的天气时，飞机的外表面铝制材料与冰晶粒子或水滴粒子撞击时，发生电荷交换，常使得飞机带负电；而当尘土或者砂粒与飞机外表面铝制材料接触时，电子一般从铝制材料流向砂粒（因为铝的功函数小于砂粒），使得飞机带正电。飞机摩擦电分布遵循特定规律，下文从基本特性、机体分布及飞行姿态影响三方面分析。

### 3.1 飞机摩擦电的基本特性

单次飞行飞机净电荷量约1毫库仑，结合机体500皮法电容可转化为50千伏高压。受“尖端效应”影响，电荷优先聚集于机翼/尾翼尖端、机翼前缘、外置天线等尖锐部位，易形成强电场引发放电。

### 3.2 摩擦电的机体分布特征

飞机的机头前端、机翼末梢、机尾末梢、垂尾上端和其它曲率较大的位置处电荷密度较大，而在飞机整体几何凹陷处，如机翼、尾翼与垂尾与机身连接等处，电荷密度较低。机翼上的电荷分布主要集中在机翼边缘处，在机翼翼头边缘处较大，电荷分布由翼头边缘向机翼表面逐渐减小。机翼前缘因直接承受高速气流冲击，摩擦电密度最高，可达机身中部的3-5倍；机翼尖端与小翼是摩擦电重点聚集处，其尖端效应最显著；尾翼前缘的摩擦电呈沿前缘的条带状分布；金属机身因导电性好，摩擦电分布相对均匀，大量自由电荷富集于机身；发动机进气道唇口、涡轮扇叶高速旋转与来流大气摩擦也将产生摩擦电；雷达罩边缘因复合材料导电性差、气流易紊乱，电荷易堆积。

### 3.3 飞行姿态对摩擦电分布的影响

飞行姿态影响电荷分布：起降阶段电荷集中于机身下部（低空粉尘摩擦频繁）；巡航阶段向机翼前缘、尾翼等迎风面转移，且随高度升高积累增多。摩擦电易在尖锐、低导电部位聚集，受气象与速度影响显著，威胁飞行安全。

## 4 摩擦电对飞行安全的隐患及事故分析

## 4.1 静电的主要累积位置及成因

部位	产生原因	典型电荷分布
机翼、尾翼尖端	与空气、云粒子摩擦	正负电荷在尖端集中
控制面（襟翼、升降舵）	气流冲击导致局部摩擦	电荷在金属边缘聚集
燃油箱内部	燃油与油箱壁相对运动	绝缘燃油导致电荷难以释放

## 4.2 静电的潜在安全隐患

### 4.2.1 电磁干扰 (EMI)

静电放电产生强脉冲电磁波，干扰通信、导航、雷达等设备，导致信号衰减或误报，对中长波导航系统干扰显著，可能增大定位误差。

### 4.2.2 火灾与爆炸风险

燃油箱或油路附近放电产生的火花，易点燃高挥发性燃油引发爆燃或火灾；地面加油、维护时，未泄放的静电接触金属部件产生火花，危及人员与设施。

### 4.2.3 电子设备损坏

高能静电放电会击穿机载半导体器件，造成电路过压，导致电子设备永久性损坏或功能失效，影响核心系统运行。

## 4.3 飞机现有静电防护措施

措施	原理/作用
放电刷（静电放电装置）	将机体表面的静电引导至大气，形成持续低电流放电，防止电荷积累
导电轮胎	着陆瞬间将机体电荷通过轮胎导入地面，快速泄放静电
机体接地与搭铁	将机身各部位电位统一，降低局部电位差，防止火花产生
防静电涂层/材料	使用导电或半导体涂层降低表面电阻，抑制电荷聚集
放电刷几何优化	通过实验确定刷子伸出长度和形状，以提升放电效率
监测系统	在机体关键部位安装静电电压传感器，实时监控电荷水平，预警异常

## 4.4 飞机静电事故典型案例

1992年USAir Express Beech 1900坠机事故中，航班因下下滑道信号异常撞山致3人遇难，根源是气象雷达未检测的冰晶云引发严重降水静电 (P-Static)。

静电通过放电刷形成10-20兆赫宽频带射频干扰，淹没ILS下滑道信号导致导航失效；同时干扰磁罗盘，使自动驾驶系统误判姿态，引发可控飞行撞地。

事故启示：现代飞机采用双冗余导航系统（如GPS+惯性导航）并强化屏蔽滤波抗干扰；气象雷达需新增冰晶检测模式预警高静电区域。

摩擦电不可避免，未及时泄放易引发多重隐患，现有防护与监测手段可将风险降至可接受水平。

## 5 摩擦电的防治技术与未来应用

### 5.1 现阶段核心应对策略

核心策略为阻止电荷富集：复合材料机身嵌金属网格、机翼前缘涂导电涂层导走静电；油箱内壁设抗静电涂层，加油时接地；定期检查放电刷与涂层完整性。

民航客机核心防护手段：法拉第笼结构均匀分布电荷；放

电刷导静电入大气; 复合材料嵌导电网提导电性; 关键电子系统电缆屏蔽接地防静电耦合。

波音787因大量使用碳纤维复合材料削弱导电性, 针对性采用: 复合材料表层嵌金属网或掺杂导电纳米颗粒改性; 关键结构嵌金属箔层形成机身法拉第笼; 电子系统布线双层屏蔽接地优化电磁兼容。此外, 静电场驱动轻量执行器减少液压系统使用, 实现减重降本。

## 5.2 未来应用方向

### 5.2.1 摩擦电收集

通过机身复合材料嵌金属网形成导电层, 汇聚分散静电至预设放电点; 利用耐高温低电阻放电刷收集电荷, 安装于机翼前缘等富集区, 具有轻量化、可靠性高、环境友好优势。

### 5.2.2 应用场景拓展

收集到的摩擦电其具有不稳定, 需单次使用的特点, 可为机上元器件提供电力, 进入启动客机的APU装置, 或者减少对APU的依赖, 有助于飞行节能减排, 促进绿色飞行。

同时, 机身不同部位的摩擦电感应模块, 可通过电荷产生量的变化预测气流速度、方向, 提前预警湍流; 若发动机叶片摩擦电异常增多, 能作为早期故障预警信号。从严谨防范的安全隐患到前景广阔的利用资源, 摩擦电的“逆袭”之路, 彰显着科技化“危”为“机”的无限可能。

## 6 结论

民航客机高空飞行时机身与空气粒子的摩擦会产生摩擦电, 其在有可能因电荷积累干扰航电、威胁安全的同时, 也蕴含开发潜力。摩擦电本质是电荷转移, 产生的电荷量及分布受材料、形状、环境、飞行状态影响, 常聚集于机翼前缘等结构尖端。在防范方面可以通过机身嵌金属网格、涂导电涂层、加油接地等可防电荷聚集以消隐患; 还能借摩擦纳米发电机发电, 或用感应模块预警气流与故障, 实现化“危”为“机”。

### [参考文献]

[1]方庆园, 周江波, 季启政, 等. 飞行器表面沉积静电分布仿真[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 3006-3012.

[2]郑会志, 胡小峰, 杜照恒, 等. 飞行器表面材料沉积静电成因分析及模拟试验[J]. 高压技术, 2011, 37(10): 2612-2616.

[3]童晨, 李海龙, 尚嘉伟, 等. 飞行器沉积静电充电电流计算方法[J]. 空气动力学报, 2024, 39(9): 498-503.

[4]吴谦, 张小龙, 李然. 基于气体驱动的固液摩擦起电能源收集装置设计与应用[R]. 湖北: 三峡大学, 2024: 4-6.

[5]王天顺, 刘树斌, 吕朝晖. 飞机静电环境特性研究[J]. 飞机设计, 2008, 28(6): 59-65.

[6]杨真一, 张少卿, 吴群. 飞行器表面静电放电抑制的研究[C]//2010年全国电磁兼容会议论文集, 2010: 6-9.

[7]黄凌龙, 包贵浩. 民用飞机静电防护设计与适航验证[J]. 科学技术创新, 2025, (13): 66-69.

[8]宋金泽. 飞机沉积静电可控泄放方法——静电放电器[J]. 电光与控制, 2013, 20(8): 100-104.

[9]肖希天, 罗维治. 论静电平衡条件下导体表面的电荷分布[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 1989, (1): 36-42.

[10]原青云, 刘尚合, 武占成. 飞机静电起电放电机理及带电极性的相关研究[J]. 军械工程学院学报, 2008, 20(2): 33-35.

[11]肖猛, 刘金凤, 刘修宽, 等. 涵道式无人飞行器静电防护技术研究[J]. 探索与观察, 2016(5): 61-62.

### 作者简介:

程子熙(2004--), 男, 汉族, 广东广州人, 本科在读, 研究方向: 飞行器制造工程。

陈双(2003--), 男, 汉族, 上海人, 本科在读, 研究方向: 飞行器制造技术。

张佳辉(2006--), 男, 汉族, 河南濮阳人, 本科在读, 研究方向: 飞行器制造技术。

李垚磊(2006--), 男, 汉族, 上海人, 本科在读, 研究方向: 飞行器制造技术。

张凯勋(2005--), 男, 汉族, 云南昆明人, 本科在读, 研究方向: 飞行器制造技术。