

Zhang Y J, Meng Q, Paul R K, et al. Experimental analysis of electromagnetic noises from airplane flying trough clouds. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(5):785~789

穿云飞机电磁噪声的实验分析

张义军^{1,2} 孟 青¹ Paul R. Krehbiel³ 刘欣生²

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

3 New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico, USA

摘 要 利用高灵敏度和高时空精度的三维雷电观测系统 LMA (Lightning Mapping Array) 分析穿云飞机的观测资料, 发现这一系统在地面可探测到穿云飞机产生的 60~66MHz 带宽内的电磁辐射, 其强度在 1W~10kW 之间, 甚至更高, 且与所探测到的辐射源数成线性反比, 辐射是由飞机上的尖端放电产生的。穿云飞机在 10~12km 高度上产生的辐射最强, 且在靠近发生闪电的对流区比远离这一区域强。飞机穿过不同云系时, 辐射强度不同, 其中穿过层状云系时, 辐射最弱。

关键词 电磁噪声 电磁辐射 闪电 雷暴云

文章编号 0001-5733(2004)05-0785-05 中图分类号 P483 收稿日期 2002-12-11, 2004-03-03 收修定稿

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC NOISES FROM AIRPLANE FLYING TROUGH CLOUDS

ZHANG Yi-Jun^{1,2} MENG Qing¹ Paul R. Krehbiel³ LIU Xin-Sheng²

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Lanzhou 730000, China

3 New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico, USA

Abstract The radiations produced by airplane flying through clouds were measured by using the New Mexico Tech Lightning Mapping Array (LMA) system with high space and time resolution on the ground. The analysis results indicate that the source powers of airplane radiation vary from minimum locatable values of about 1W typically up to 10kW or more in the 60~66MHz passband of the receivers and follow an approximate line inverse proportion to the numbers of radiation sources. This is a kind of radiation produced by discharge. The maximum powers of radiations occurred when airplane flew at 10~12km altitude or near the convective region with lightning flashes occurring. The powers of airplane radiation were different for different kinds of clouds through which airplane flew. The radiation sources of airplane were weakest when airplane flew through the cirrus clouds.

Key words Electromagnetic noise, Electromagnetic radiation, Lightning discharge, Thunderstorm.

1 引 言

飞机在云中飞行时, 常常形成大量本地射电干

扰。早在 20 世纪 50 年代就有学者研究其形成机制, 结果表明^[1], 产生这种干扰的主要原因是, 在云中飞行过程中飞机表面与水滴或冰晶粒子之间发生碰撞, 飞机充电并达到相对周围空间的一定的高电

基金项目 国家自然科学基金重点(40135010)和面上基金项目(49975003)。

作者简介 张义军, 男, 生于 1963 年 12 月, 1998 年毕业于中国科学院兰州高原大气物理研究所大气物理专业, 获博士学位, 研究方向为大气电学。E-mail: zhangyj@cams.cma.gov.cn

位,使飞机尖端产生电晕放电.电晕放电是由放电点发出的、以闪光形式流动的短脉冲电流,变化的电流不仅产生一个辐射场,而且也使本地静电场发生巨大变化,该静电场可强烈地与附近的接收天线相耦合,从而阻碍对无线电信号的接收.随着现代数字控制系统在飞机上的应用,这种干扰会引起许多新问题.如可造成通讯联络暂时中断、强电磁场可影响磁罗盘产生误差等,为了解决这些问题,很多人对此进行了大量观测和研究工作.但大多采用飞机携带探测仪器进行穿云观测和实验室实验^[2~4].1998年由美国 New Mexico Tech 发展起来的三维雷电观测系统 LMA,具有高灵敏度和高时空精度的特点,可以在地面很好地探测到穿云飞机上产生的电磁辐射.在 2000 年夏季的 STEPS (Severe Thunderstorm Electrification and Precipitation Study) 实验中,利用这套雷电观测系统不仅得到了许多有关雷电方面的新结果,同时还观测到不少飞机穿云时产生的辐射.本文将对此进行初步分析和讨论,以求对问题的深入研究.

2 观测和分析

三维雷电观测系统 LMA 的主要原理是利用 GPS 系统和时差技术定位雷电的 VHF 辐射源,从而得到雷电发生发展过程的三维时空分布特征^[5,6].这一系统的时间分辨率为 50ns,空间精度可达 50~100m,其中心频率为 63MHz,带宽为 6MHz.在 STEPS 实验中 LMA 闪电观测系统设在 Kansas 州的西部和

Colorado 州的东部,共有 13 个测站,可以探测 300km 以内的闪电活动.由于观测区接近 Denver 国际机场,所以 LMA 观测系统观测到很多飞机在穿云过程中产生的辐射,并得到飞机在云中的飞行轨迹.图 1 是 LMA 对穿云飞机的观测结果,图中的每一个点是 LMA 对飞机飞行过程中产生的电磁辐射点的定位结果.从 1d 图可见,在 10min 时间间隔内有 7 架飞机穿过测站上空,图 1d 中 A~G 代表不同的飞机,它们分别在不同的高度上飞行. A 正在由 7km 到 6 km(海拔高度,下同)下降, B 的下降高度由 8km 到 7km,而 F 正在从 11km 上升到 12km,其他飞机则均在同一高度上飞行,飞行高度最高的是 G,为 12.3km.在此期间,在 LMA 系统的探测范围内,仅在距测站中心南部 50km 远处有雷电活动发生,从雷达资料可知,这一区域雷达回波强度超过 40dBz,而在飞机穿过的区域,雷达回波强度小于 25dBz,没有雷电活动发生.

表 1 列出了这 7 次穿云飞机的总体特征参数,其中飞机的飞行速度是由 LMA 系统的观测计算得到的.从表可知飞机 A 的最大辐射功率最小,为 6.8dBW(4.8W),而飞机 E 的最大辐射功率为 41.4dBW,平均辐射功率也最大,为 4.56dBW.尽管飞机 G 的飞行高度最高,飞行速度也最大,但最大辐射功率最大值仅为 18.9dBW,平均辐射功率为 1.14dBW. Illingworth 等^[2]的实验室实验结果表明,穿云飞机所携带的电荷量与飞机的飞行速度和冰晶粒子的尺度呈正相关.飞机 A 和 B 的飞行高度较低,与飞机碰撞摩擦的水成物粒子以水滴和软雹为

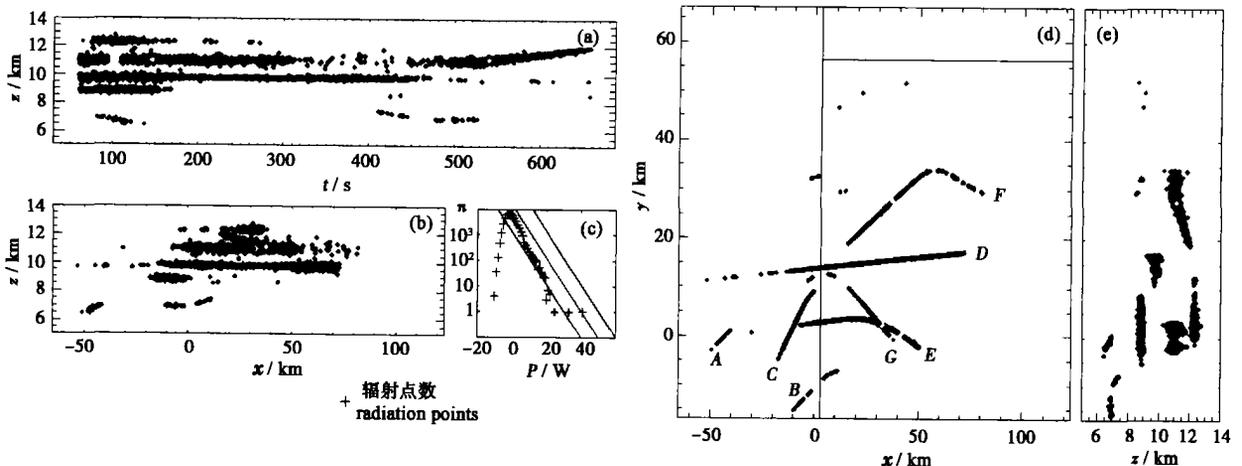


图 1 2000 - 05 - 26 - 03:20 ~ 3:30 LMA 系统对穿云飞机的观测

(a) 辐射源高度 z 随时间的变化;横坐标为 03:19 之后的秒数; (b) 在南北方向上的垂直投影; (c) 辐射源数目 (n) 随辐射功率 (P) 的分布; (d) 平面投影; (e) 在东西方向上的垂直投影. 图 1c 中的斜线条表示纵坐标与横坐标线性反比的斜率. x, y 分别为东西、南北方向的距离.

Fig. 1 Observation of airplane radiations from 03:20 to 03:30UTC on May 26, 2000

主,可能这些粒子与冰晶粒子相比使飞机充电较弱.而飞机 G 的飞行高度已到达云顶,冰晶粒子的尺度小且浓度低,所以飞机的带电也较弱.但飞行高度处于 10~12km 高度的飞机,由于冰晶粒子尺度和浓度都比较大,所以在这一高度上飞机携带的电荷量也最大.另外从图 1c 可知,大于 0 辐射功率与辐射点数基本成反比,这与 Thomas^[7]等对闪电放电产生的辐射功率分析的结果相一致,进而说明飞机穿云时产生的辐射是由一种放电过程产生的.

表 1 2000 - 05 - 26 - 03 :20 ~ 03 :30 7 架穿云飞机(A ~ G) 的总体特征参数

Table 1 The general parameters of airplane radiations from 03 :20 to 03 :30 on May 26, 2000

	A	B	C	D	E	F	G
P_m / dBW	6.8	7.2	14.3	19.2	41.4	25.6	18.9
P / dBW	1.17	- 1.66	- 1.91	2.43	4.56	4.16	1.14
h / km	7 - 6	8 - 7	8.8	9.8	11	11 - 12	12.3
v / (m s ⁻¹)	188	202	204	214	219	201	227

P_m :最大辐射功率; P :平均辐射功率; h :飞行下降或上升高度; v :速度.

图 2 显示了在 02 :20 ~ 02 :30 期间有 4 架飞机穿过测站上空,在最北的测站附近有闪电发生.表 2 列出了这 4 架飞机的特征参数.从图 2 和表 2 可见,飞机 A、B、C 的飞行高度和速度一样,且基本在同一区域,但飞机 A 的辐射功率最强,其最大辐射功率为 30.68dBW,平均辐射功率为 13.93dBW,而飞机 B 和 C 基本相同.这可能是因为飞机 A 更靠近云中对流区.因为在这一期间在最北边的测站附近

有少量的雷电活动发生.而飞机 D 从距测站中心 130km 处开始有辐射被探测到,其飞行高度和速度分别为 12.2km 和 232m/s,最大辐射功率和平均辐射功率分别为 32.11dBW 和 16.36dBW,比飞机 A、B、C 都大,这可能与飞机 D 的飞行高度高以及它们处于不同的区域有关.

表 2 2000 - 06 - 07 - 02 :20 ~ 02 :30 穿云飞机的总体特征参数
Table 2 The general parameters of airplane radiations from 02 :20 to 02 :30 on June 7, 2000

	A	B	C	D
P_m / dBW	30.68	23.73	23.78	32.11
P / dBW	13.93	8.91	7.84	16.36
h / km	10.3	10.4	10.4	12.2
v / (m s ⁻¹)	244	243	247	232

从图 3 可见云中两个对流单体产生闪电,表示负地闪发生的时间和位置,其中在 8.8km 高度上的直线是飞机穿云时产生的辐射.这架飞机从西南向西北飞行,在前 10min,飞机的飞行区没有闪电发生,飞机的飞行速度为 230m/s,其最大辐射功率和平均辐射功率分别为 22.87dBW 和 2.71dBW.而在后 10min 飞机从发生闪电的两个单体之间穿过,虽然飞机的飞行高度和速度没有变化,但辐射功率增强,其最大辐射功率和平均辐射功率分别为 31.75dBW 和 7.95dBW.随着飞机靠近云中对流区,其辐射逐渐增强.

表 3 是 4 架穿云飞机的特征参数.在这期间,距探测中心 200km 的范围内没有闪电发生,由雷达

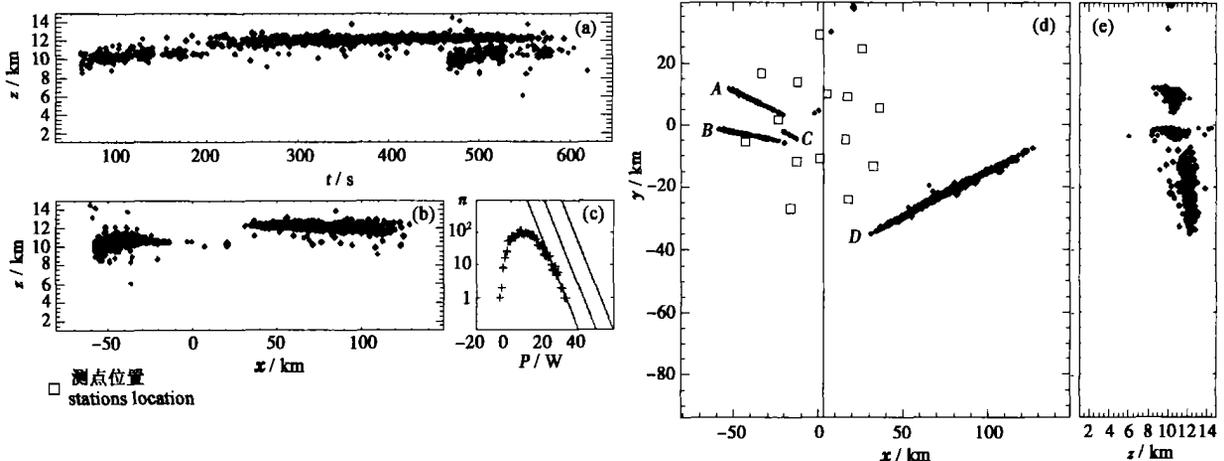


图 2 2000 - 06 - 07 - 02 :20 ~ 02 :30 LMA 系统对穿云飞机的观测结果

- (a) 辐射源高度随时间的变化;横坐标为 02:19 之后的秒数;
- (b) 在南北方向上的垂直投影;
- (c) 辐射源数目(n)随辐射功率(P)的分布;
- (d) 平面投影;
- (e) 在东西方向上的垂直投影.

Fig. 2 Observation of airplane radiations from 02 :20 to 02 :30UTC on June 7, 2000

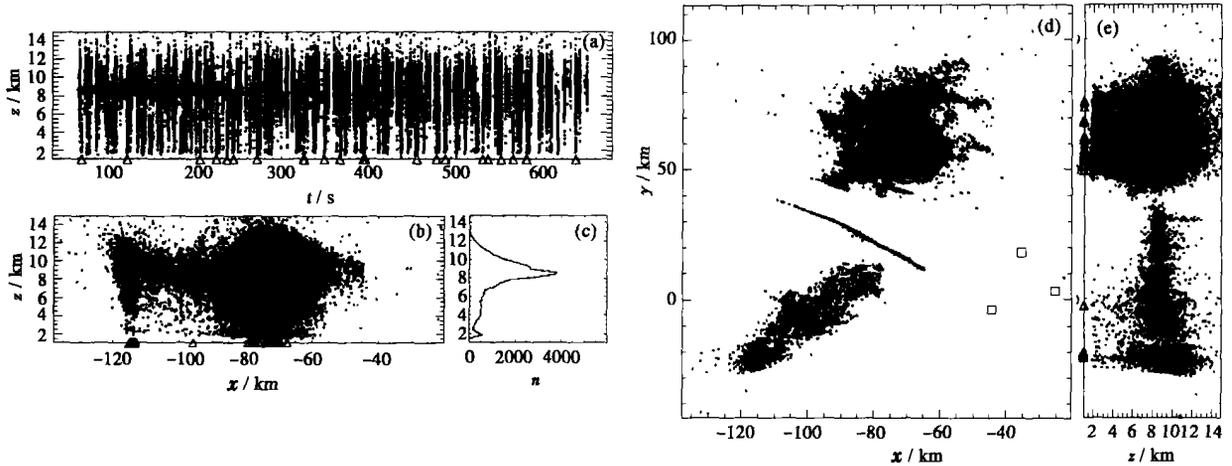


图3 2000 - 05 - 25 - 22:30 ~ 22:40 一架飞机的穿云观测

(a) 辐射源高度随时间的变化;横坐标为 22:29 之后的秒数;(b) 南北方向的垂直投影;(c) 辐射源数(*n*)随高度的分布;
(d) 平面投影;(e) 东西方向的垂直投影.

Fig. 3 Observation of airplane radiations (line) from 22:30 to 22:40 on May 25, 2000

资料可知,这一云系为层状云,其最大雷达回波强度为 20dBz. 尽管 4 架飞机的飞行高度和速度有所不同,但辐射功率都比较小,其最大的辐射功率最大值也只有 10.4dBW. 这可能主要是因为这一云系为层云,云中并没有对流活动发生,云中冰晶特征不同所致.

表3 2000 - 07 - 12 02:40 ~ 02:50 4架穿云飞机的总体特征参数

Table 3 The general parameters of airplane radiations from 02:40 to 02:50 on July 12, 2000

	A	B	C	D
P_m / dBW	4.4	5.0	9.8	10.4
P / dBW	- 0.18	- 1.53	1.49	0.67
h / km	10	12.6	11.6	12.5
v / (m s ⁻¹)	236	216	226	213

3 结论和讨论

3.1 三维闪电观测系统(LMA)可以在地面探测到穿云飞机产生的射电辐射,飞机在穿云过程中可以产生不同强度的电磁辐射,其值在 1W 到 10kW 之间,甚至更高,且大致与所探测到的辐射源数成线性反比,辐射是由飞机上的放电过程产生的,其特征与闪电放电产生的电磁辐射相似.

3.2 穿云飞机在不同的高度上产生的辐射强度不同,产生最强辐射的飞机飞行高度约为 10 ~ 12km.

3.3 穿云飞机在靠近发生闪电的对流区时,其辐射

强度比远离这一区域飞行的飞机的辐射要强.

3.4 飞机穿过不同云系时,辐射强度不同,飞机穿过层状云系时,辐射最弱.

穿云飞机产生的辐射除取决于飞机表面的材料和飞机的飞行速度之外,更主要的取决于云系的类型. 在对流云系中由于冰晶粒子携带了更多的电荷,通过与飞机表面的碰撞摩擦,使飞机可以获得更多的电荷,而在层状云系中冰晶粒子携带的电荷比较少,所以飞机难以获得较多的电荷,因而辐射较弱. 但在同一云系中,由于云中冰晶粒子浓度和尺度随高度不同,所以飞行在不同高度上的飞机产生的辐射不同. 在 10 ~ 12km 高度飞机的辐射功率最大,因为在云中 6 ~ 8km 高度,水成物粒子多为尺度较大的水滴或软雹,而在 10 ~ 12km 高度水成物粒子基本为冰晶,且浓度较高,在 12km 高度以上,尽管水成物粒子为冰晶,但浓度要低,且尺度也较小,所以当飞机的飞行速度相差不多时,飞机的带电更主要取决于冰晶粒子的浓度和尺度. Illingworth 和 Marsh^[2]的实验室实验结果表明,在冰晶与飞机的碰撞带电过程中,飞机的带电量与冰晶粒子的大小成正比,冰晶粒子与飞机的每次碰撞所转移的电荷量与飞机的速度呈正比,随着速度的增加,转移的电荷量也增加. Tanner 等^[3]的观测表明,在层状云系和对流云系中,飞机上的电流密度分别为 50 ~ 100 μ A \cdot m⁻² 和 100 ~ 200 μ A \cdot m⁻². Boulay 等^[4]的测量得到飞机的充电电流可达到 3mA.

在 STEPS 试验中, LMA 测量系统不仅探测到穿

云飞机上产生的电磁辐射,同时还探测到探空气球的运动轨迹以及电视发射塔的辐射等,由此可推知,利用 LMA 测量系统可以在地面被动探测各种具有电磁辐射或通过某种机制产生电磁辐射的飞行器的运动轨迹和固定电磁辐射源的精确位置,由于 LMA 测量系统的高灵敏度和高时空精度,在航空航天、电力和国防部门都具有潜在的应用前景。

参考文献

- [1] Jones, J J. Electric charge acquired by airplanes penetrating thunderstorms. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**: 16589 ~ 16600
- [2] Illingworth A J, Marsh S J. Static charging of aircraft by collisions with ice crystals. *Revue De Physique Appliquee*, 1986, **12**: 803 ~ 808
- [3] Tanner R L, Nanevics J E. An analysis of corona generated interference in aircraft. *Proc. IEEE*, 1964, **6**(2): 568 ~ 573
- [4] Boulay J L, Laroche P. Aircraft potential variations in flight. Eighth Lightning and Static Electrification Conference, Fort-Worth, 1983. 125 ~ 129
- [5] Krehbiel P, Thomas R, Rison W, et al. Lightning mapping observations in central Oklahoma. *EOS*, 2000, **81**(1): 21 ~ 25
- [6] Rison W, Thomas R J, Krehbiel P R, et al. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 3573 ~ 3576
- [7] Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. Comparison of ground-based three-dimensional lightning mapping observations with satellite-based LIS observations in Oklahoma. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**: 1703 ~ 1706

欢迎订购《地球科学量和单位规范使用辨识》

《地球科学量和单位规范使用辨识》一书由孙群、沈丽璞编撰,李慎安、王妙月总审。作者是长期从事科技编辑工作的编审。总审者分别是曾为量和单位国家标准主要起草的老专家和地球物理学博士生导师。

地球科学是一门历史悠久而又发展迅速的学科,涉及海、陆、空三界,分支学科多,又与其他学科交叉结合,使用的量和单位几乎触及自然科学各门类。本书依据量和单位的国家标准,针对地球科学的特点和地学书刊中使用量和单位出现的各种问题,编撰的《地球科学量和单位规范使用辨识》一书。具有以下特点:

来自实际,用于实际。本书是关于地球科学量和单位及其规范作用的系统研究和总结,是法定计量单位和国家标准在地球科学中的具体应用。全书以国际、国家标准为基准,并学习、参考国际和国内有关量和单位的专著和文章,从我国几十种地学核心期刊及专著使用量和单位出现的各种问题上,选出了 400 多个实例,进行归纳、分类并逐条分析,说明问题所在,写出规范表达,力求达到正确规范使用量和单位的目的。简明直观,针对性强,便于对照使用。

基于标准,兼顾地球科学的特点,补充了地球科学的常用量和单位。本书依据国家标准,参照全国自然科学名词审定委员会公布的地学名词中的有关量,以及参考国内外地学书刊中常用量和单位的使用惯例,特别是依照国际计量局(BIPM)新编《国际单位制(SI)》第 7 版,编写了地学常用量和单位 442 个。在内容上,既有量的中文名称,又有相应的英文名称和符号;既给出了量的 SI 单位,又给出了常用的其他单位及与非法定单位的换算关系,以及正确的使用规则。从而,贯彻了国家标准,并为国家标准的细化及发展完善提供了参考。

本书示例面广,分析简明,实用性强,既适合广大地学科技工作者、大专院校师生使用,又可供其他专业的科技人员使用,对科技著者、编辑、计量和标准管理人员将是一本非常有用的参考书。

本书已于 2004 年 7 月出版,全书订价 28.00 元,欲购者请与地震出版社发行部联系。电话:68467993 或 68467991(零售)。

(地震出版社 姚家榴)