

目前市场上主要商用的磁力仪有磁通门磁力仪，质子磁力仪，Overhauser 磁力仪，光泵磁力仪和超导量子干涉磁力仪。海洋磁力和地面磁力仪对设备重量要求不高，且移动速度相对较慢可以使用磁通门，质子/overhauser，光泵磁力仪。质子磁力仪和 Overhauser 磁力仪由于工作方式，梯度容差，采样速率等先天限制，比较少用于航空磁测。而航空磁测，受制于探测原理、探头物质、体积、重量、采样速率、价格等多方面因素制约，商用航空磁测以光泵磁力仪为主，磁通门磁力仪作为补偿或者三分量测量为辅。特别是无人机航磁，对磁力仪的重量，安装位置要求更高，集成工作难度远远超过传统载人飞行器。

航空磁测最早用于海军针对潜艇引起的磁异常进行探测，后用于民用的航空物理勘探工作。在物理勘探领域，航空磁测具有速度快、精度高、不受地表干扰等特点，在地质制图、大区域地质构造研究、铁矿和其他金属矿矿藏资源的评价、石油天然气成矿远景区的预测、工程地质和环境监测时广泛使用。以往的航磁测量都是在固定翼飞机或直升机上进行设备搭载测量，但航空勘察成本高昂，为获得高质量数据，低空飞行有巨大风险，而飞行高度过高，反映的地质效果分辨率较低，无法开展大比例尺工作。

其次由于飞行器材料多为金属，或多或少都有弱磁性。飞行中发动机转子运动产生的磁场，以及飞机内航电系统通电后产生的感应磁场都会对磁力仪造成干扰。为了让飞行器能搭载光泵磁力仪并获得有效数据，1944年由美国海军部门的Tolles和Lawson(1944)给出了和飞机机动有关的干扰场的工作模型。他们将与飞机机动有关的飞机磁场分为恒定磁场 H_p (Permanent field)、感应磁场 H_i (Induced field)和涡流磁场 H_c (Eddy-current field)。恒定磁场是指飞机上的磁性零部件和铁磁性材料剩磁所产生。感应磁场主要是由飞行器机体上的软磁性材料在地磁场中被磁化而产生的，该磁场的大小与引起它的外加磁场成正比，因此在三轴磁通门传感器坐标系下，感应磁场的大小与方向将随着无人机的姿态变化而变化。涡流磁场是金属机体飞行中切割地磁场而产生的，其各分量与投影到各坐标轴上的地磁场变化率成正比。

Leliak 在 1961 年对该模型进行了理论上的论证，将光泵航磁补偿方法表达为理论公式如下：

$$H_T = c_1 \cos X + c_2 \cos Y + c_3 \cos Z$$

$$+ H_e \{ c_4 \cos^2 X + c_5 \cos X \cos Y + c_6 \cos X \cos Z + c_7 \cos^2 Y + c_8 \cos Y \cos Z + c_9 \cos^2 Z \} \\ + H_c \{ c_{10} \cos X (\cos X)' + c_{11} \cos X (\cos Y)' + c_{12} \cos X (\cos Z)' + c_{13} \cos Y (\cos X)' + c_{14} \cos Y (\cos Y)' + c_{15} \cos Y (\cos Z)' + c_{16} \cos Z (\cos X)' + c_{17} \cos Z (\cos Y)' + c_{18} \cos Z (\cos Z)' \} \quad \text{公式 1}$$

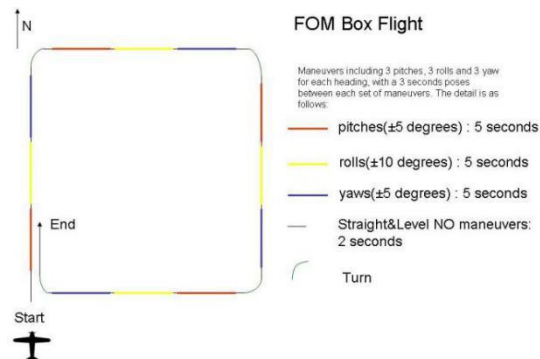
H_r 指干扰磁总场， H_e 指地球磁场， $(\cos X, \cos Y, \cos Z)$ 是与飞行器位置固定的三轴磁通门的三份量对应其轴向的方向余弦， $()'$ 指投影到各坐标轴磁场方向余弦的变化率。 $c_1 - c_{18}$ 是 18 个估计参数。其中 $c_1 - c_3$ 与恒定磁场干扰 H_p 有关， $c_4 - c_9$ 与感应磁场干扰有关， $c_{10} - c_{18}$ 与涡流磁场干扰有关。

1980 年 Leach 通过进一步研究，将模型补偿系数求解过程看作解线性方程组，提高了求解出系数的稳定性。随着计算机的发展和高精度航磁探测工作的推进，磁补偿从硬件反馈线圈模式发展到了软件实时、飞行后补偿的成熟商用产品。

载人飞行器航磁测量方法一般使用光泵磁力仪作为总场磁力仪来进行数据采集工作。如果是磁力仪与飞行器采用硬连接方案，需要使用三轴磁通门磁力仪来记录飞行姿态。先进行高空四边带机动飞行以获得光泵磁力仪总场和三轴磁通门矢量磁场数据生成的方向余弦参数，通过滤波和解线性方程来获得补偿估计参数，再以该系列估计参数对实际工作测量中的数据进行补偿计算，以去除飞行器对光泵磁力仪产生的磁干扰。

在光泵航磁补偿系统中，三轴磁通门磁力仪的作用仅用来记录飞行姿态也获得方向余弦参数并不用来计算地磁总场数据。由于不考虑三轴磁通门自身的零偏误差、灵敏度误差，探头自身的硬铁 (hard-iron) 和软铁 (soft-iron) 效应以及三轴非正交误差，同时

公式 1 中三轴磁通门数据产生的方向余弦与自身三轴矢量磁场计算出的地磁总场的多元线性回归方程求解会有严重的多重共线性的问题，所以使用光泵磁补偿公式 1 是无法有效的运用在三轴磁通门磁力仪的矢量磁场和地磁总场数据矫正和补偿算法模型上的。



航磁补偿典型的四边飞行

伴随着应用技术的成熟，无人机在航空磁测中应用显著增加，无人机搭载航磁测量设备能够快速部署，高效、高精度的采集数据，开展大比例尺航磁作业不仅能够消除地面地表等干扰物和起伏地形产生的影响，充分节省成本，而且也能够在地质环境和安全标准禁止有人驾驶飞机磁测系统的环境中，可以根据最佳的地形空间来承担探测任务甚至能比载人飞行器航磁系统提供更好质量的探测数据。

由于对磁性部件特别敏感的特性，航磁系统对于无人机的平台选择有比较特殊的要求，无人机的低磁性，飞行特性和续航时间，是实际航磁作业的关键因素之一。目前市场上，无人机种类大致可分为单旋翼，多旋翼和固定翼无人机。单旋翼无人机结构复杂，零部件繁多，研发成本非常高，周期非常长，维修不便，对操作手的要求很高。多旋翼无人机容易操控和生产，但最大的问题是续航能力比较差，飞行距离和范围也受到了很大的限制。普通固定翼无人机虽然续航能力强速度也更快，但起飞和降落都是需要平坦的地形或者专用的跑道，对于需要野外作业的矿藏勘查等物探业务显然不是合适的选择。目前市场上和技术领域出现了垂直起降固定翼无人机形式，以常规固定翼飞行器为基础，增加多轴动力单元，在起降及低速状态下按照多轴模式飞行或盘旋，而在平飞状态下，按照固定翼模式飞行，通过气动升力克服重力，大大提高了飞行时间和速度。但由于需要增加多个磁性器件如马达，电调等设备。垂直起降固定翼无人机搭载航磁需要一定的布局设计、选择及改装来满足要求，目前市场上也并无专门针对航磁系统设计的垂直起降固定翼无人机。

以往的航磁系统中需要包含GPS，光泵磁力仪，三轴磁通门磁力仪，采集器等装置，其体积较大，总重量一般在5kg以上。因此对于无人机平台的载重能力要求较高，市场上采用的多是昂贵的千万/百万级别大型固定翼无人机平台，或无人直升机平台来搭载。

其次很多商用光泵磁力仪和航磁补偿设备均依赖进口，价格非常昂贵，同时市场上主流的高精度光泵磁力仪属于敏感设备，进口受制于人。

再者根据目前国家相关法律法规，空机重量大于4kg，起飞重量（包含电池）大于7kg的无人机属于II类以上的无人机，无论是否在视距内飞行，都需要事先申请空域。而低于此重量要求的内，在适飞空域内，视距内飞行，不需要预先申请空域，只需实时上报到监管平台。上述条件大大限制了无人机光泵磁力仪航磁测量系统的推广和应

用，目前主要研究和技术都集中在高校和国家级科研院所等国家项目中，真正完全市场化和产品化的平台还未出现，加泰科针对上述情况推出了**GTK-M300多旋翼无人机航磁系统**和**GTK-R007垂起固定翼无人机航磁系统**，此两种系统起飞全重均小于7Kg。

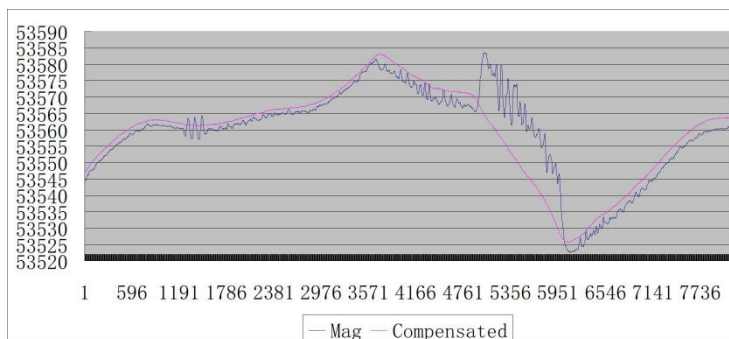
航磁光泵及磁通门双补偿技术

加泰科（深圳）科技有限公司 **GTK-RB-COMP** 无人机航磁补偿系统集成了高精度铷光泵磁力仪，高精度磁通门三分量磁力仪，GPS，激光高度计，9轴姿态传感器，使用业内成熟固定翼航磁补偿技术和自有发明专利补偿技术结合，采用航磁光泵及磁通门双补偿技术，实时或飞行后补偿方法将飞行器机动飞行时，对两种磁力仪探头产生的干扰，采用软件补偿的方法去除掉。

光泵补偿技术

使用软件补偿方式对航空磁测数据进行补偿。系统使用矢量磁力仪的三份量作为姿态因子，将飞行器的永久磁场，感应磁场和涡流磁场通过算法从总场中去除。

在离地面尽量远的磁场平缓地带，根据预先四边飞行的数据，估算出 18 项系数。在随后的实际工作调查飞行中，使用 18 存储项系数来对采集到的数据进行软件处理。



磁通门补偿技术

磁通门磁力仪 12 参数数字补偿算法，获得轴向干扰，比例系数，正交度误差和软体效应的 12 个修正参数，可对磁通门磁力仪输出的总场进行实时补偿。

