

EPSILON测试报告

ε

高性能惯性卫星组合导航系统车载和纯惯导测试

2025年12月飞迪 FDI systems 公司在合肥进行了跑车实验，主要测试EPSILON产品在GNSS中断情况下的姿态、速度以及位置漂移的情况。该测试使用猎户Orion9光纤惯性组合导航系统 (10s平滑 $0.01^{\circ}/h$ 光纤陀螺, 20ug石英加速度计)作为参考基准同步测试，测试验收了规格书的指标精度，并对**航空模式**和**车载模式**的误差进行了对比分析，本报告总结了相关结果。



High Lights

- ❖ 陀螺零偏稳定性 $0.5^{\circ}/h$
- ❖ 0.015° Pitch/roll(RTK), 0.05° Heading
- ❖ 多频RTK厘米级定位双天线测向，支持网络/电台RTK
- ❖ 冗余陀螺技术，增强稳定性
- ❖ 零偏、刻度因子、正交性温度出厂标定
- ❖ 圆锥划船补偿、自适应SPKF
- ❖ 16G存储LOG
- ❖ ITAR-free 中国制造

战术级 $0.5^{\circ}/h$

FDI SYSTEMS

* Epsilon2 is a transliteration of the Greek letter Epsilon ϵ , which stands for small amount, extreme meaning and high precision

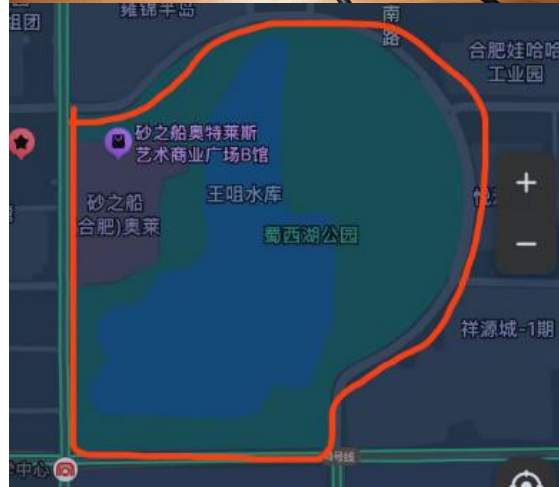
Epsilon测试方法

将测试产品与光纤惯导固定安装在木板上，木板固定在车后备箱位置，两个GNSS天线装在车顶并于测试产品连接，提前用卷尺测量测试产品到GNSS天线的杆臂以及与汽车后轮中心的杆臂值。开始测试前，先绕口子型跑车用自带的算法计算测试产品以及双天线相对于车体的安装误差角，从而将产品以及双天线与汽车对齐，用于NHC滤波；正式测试时，用零偏稳定性 $0.01^\circ/\text{h}$ 的光纤惯导作为姿态参考，用厘米级RTK作为速度位置参考，首先静止10分钟进行光纤对准，然后开始绕下图地图所示的路线进行跑车测试：

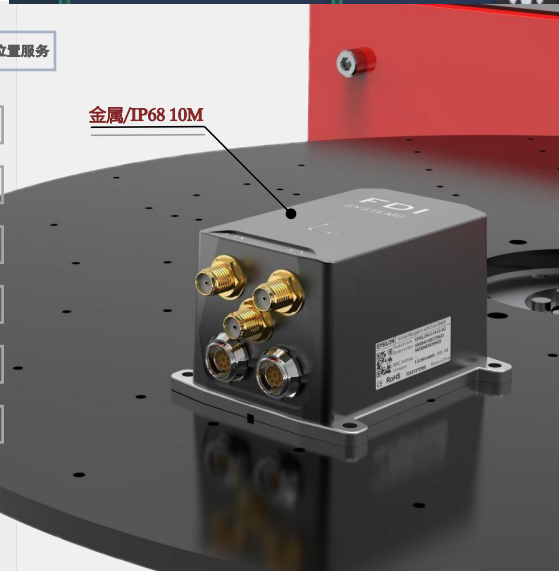
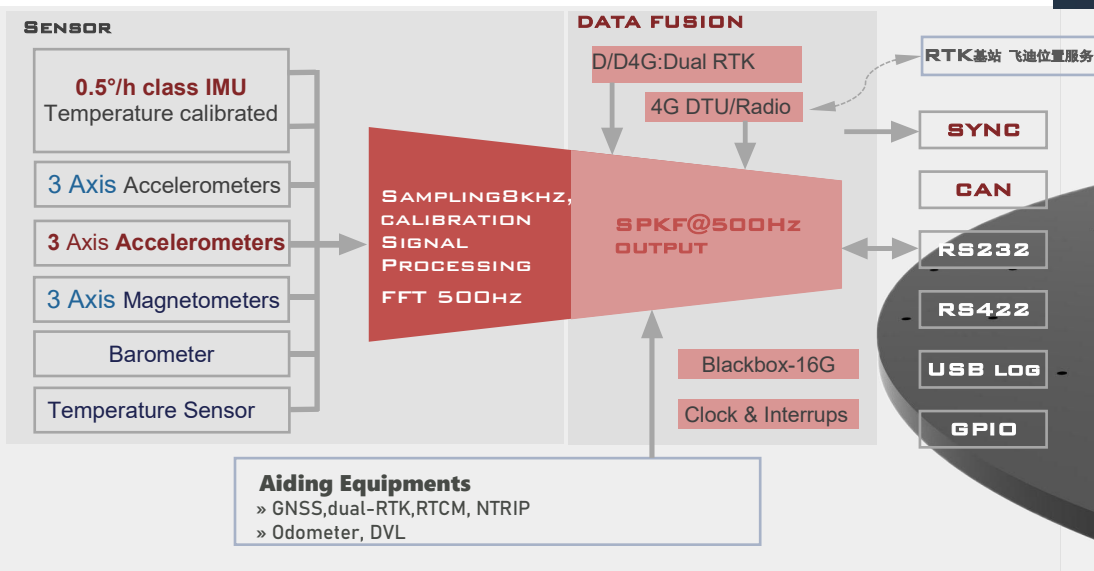
跑车测试过程中，组合导航收敛后，手动关闭GNSS/INS组合导航，从而进行纯惯导推算，包含有NHC滤波以及没有NHC滤波的情况，下面简称为**条件A(开启NHC滤波)**和**条件B(关闭NHC滤波)**；条件A利用载体在垂直和侧向速度为0作为约束来限制INS速度和位置的发散，属于虚拟参考，并没有用到其他任何传感器作参考，只要有IMU就能实现，因此条件A属于纯惯导推算(**车载模式**)；条件B也可以称为纯机械编排推算(**航空模式**)，即没有任何观测源对数据进行修正，属于最能考验INS性能的模式；

每组测试记录不同组合条件下的一圈路线的导航数据，导航数据包括：

- 测试产品的横滚、俯仰、偏航、速度、位置数据，速度和位置数据通过杆臂映射到GNSS天线相位中心；
- RTK(厘米级)的速度、位置数据(GNSS天线相位中心速度位置参考)；
- 光纤惯导的横滚、俯仰、偏航数据(姿态参考)；



系列特点



- 姿态动态: 0.05° 航向动态: 0.08° RMS
- 双天线厘米级定位定向 可靠 精准
- $<0.5^\circ/\text{hr}$ 的相对航向角度
- 2D/3D磁校准

- 里程计/声纳/雷达外部辅助接口
- 16G 存储 Log FFT 陷波器
- 4G全网通/电台版本
- 部分版本支持RTK基站模式

测试数据

跑车测试按条件A, B分类, 共2类, 每个类型测试3组。每组数据记录完成后, 将参考数据减去测试产品数据的姿态误差, 速度误差以及位置误差按10s, 30s, 60s、300s和终点时刻记录在下面的表格里。由于路线上存在红绿灯, 因此跑一圈时间不固定, 大约在9-11分钟之间, 总路程大约为4.9km。具体时间以每组曲线数据的横坐标为准。本测试数据不做特殊说明测量值均为6 σ 峰峰值。

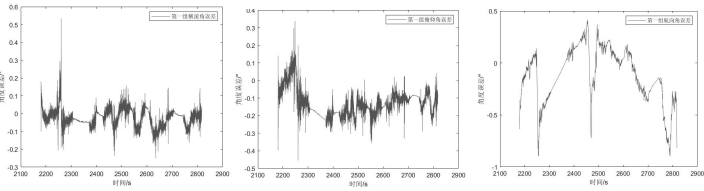
条件A(开启NHC滤波)车载模式					
GNSSS 失锁 时间误差类型	10s	30s	60s	300s	终点时刻 2900- 4000s
横滚第一组°	-0.0127	-0.0636	-0.0093	-0.0971	0.0186
横滚第二组°	-0.0270	-0.1126	-0.2149	-0.0320	-0.3343
横滚第三组°	-3.9e-04	0.1594	-0.0469	-0.0019	-0.0519
绝对值平均°	0.01336	0.1118	0.0903	0.0436	0.1349
俯仰第一组°	-0.0927	-3.8e-04	0.0835	-0.1402	-0.0954
俯仰第二组°	0.0494	0.1032	-0.1010	-0.1109	-0.1679
俯仰第三组°	-0.1269	-0.1304	-0.1301	-0.0328	0.0271
绝对值平均°	0.0896	0.0779	0.1048	0.0946	0.0968
航向第一组°	-0.0245	0.0789	0.2107	-0.0588	-0.6670
航向第二组°	-0.0464	-0.4358	-0.5442	-0.8830	-0.512
航向第三组°	0.0354	-0.2561	-0.2362	0.5349	1.5500
绝对值平均°	0.03543	0.2569	0.3303	0.4922	0.9096
水平速度第一组m/s	0.0214	0.2953	0.8609	0.1450	0.0731
水平速度第二组m/s	0.0658	0.1212	0.2498	0.1671	0.2191
水平速度第三组m/s	0.0390	0.0822	0.1479	0.2035	0.2380
绝对值平均m/s	0.042	0.1662	0.4195	0.1718	0.1767
垂直速度第一组m/s	0.0330	-4.6e-04	0.0632	-0.1126	0.0309
垂直速度第二组m/s	0.0080	0.0308	-0.0486	-0.0763	0.0274
垂直速度第三组m/s	-0.1749	-0.0279	-0.0882	-0.0026	0.0792
绝对值平均m/s	0.0719	0.0197	0.0666	0.0638	0.04583
水平位置第一组m	0.0522	2.4041	16.8001	21.4023	31.2411
水平位置第二组m	0.0025	1.1088	5.8218	5.0572	20.7892
水平位置第三组m	0.0454	0.5258	3.7046	6.9332	9.1817
绝对值平均m	0.0333	1.3462	8.7755	11.1309	20.404
高程位置第一组m	-0.0868	-0.1317	0.2938	-3.8130	-7.5871
高程位置第二组m	0.0023	0.1243	-0.0604	-2.1662	-5.1708
高程位置第三组m	0.0116	-0.0446	-1.2318	-1.7211	-5.4661
绝对值平均m	0.0335	0.1002	0.5286	2.5667	6.0746

条件B(关闭NHC滤波)航空模式					
GNSS失锁时间 误差类型	10s	30s	60s	300s	终点时刻 2900- 4000s
横滚第一组°	-0.0836	-0.1064	0.0365	0.1473	-0.0693
横滚第二组°	-0.0785	-0.0457	-0.0299	-0.1374	-0.3289
横滚第三组°	0.0019	-0.0139	-0.0157	-0.1346	0.2161
绝对值平均°	0.05466	0.05533	0.0273	0.1397	0.2047
俯仰第一组°	-0.1078	-0.1182	-0.0474	-0.1014	-0.1416
俯仰第二组°	-0.1018	-0.1162	-0.2474	-0.2159	0.1116
俯仰第三组°	-0.0637	-0.0373	-0.0470	0.1059	-0.1939
绝对值平均°	0.0911	0.09056	0.1139	0.1410	0.1490
航向第一组°	-0.0027	0.0760	0.0659	0.2856	0.0012
航向第二组°	-0.0191	-0.1267	0.1583	0.2491	0.1858
航向第三组°	-0.0427	0.1082	0.1719	0.4482	-0.0522
绝对值平均°	0.0215	0.1036	0.1320	0.3276	0.0797
水平速度第一组m/s	0.0363	0.1522	0.2848	5.3979	8.0918
水平速度第二组m/s	0.0067	0.0489	0.1749	1.5064	6.6226
水平速度第三组m/s	0.0129	0.1240	0.3775	5.7630	13.0169
绝对值平均m/s	0.0186	0.1083	0.2790	4.2224	9.2437
垂直速度第一组m/s	0.0157	0.1041	-0.0389	-0.1963	-0.6023
垂直速度第二组m/s	0.0064	0.0243	0.0429	0.0743	0.0424
垂直速度第三组m/s	0.0075	0.0036	0.0132	0.1180	0.0999
绝对值平均m/s	0.00986	0.044	0.0316	0.1295	0.2482
水平位置第一组m	0.0137	0.5315	6.7239	554.8174	1671.8
水平位置第二组m	0.0053	0.4090	0.6033	37.2760	474.1308
水平位置第三组m	0.0462	0.7792	6.7419	609.3063	2361.2
绝对值平均m	0.0217	0.5732	4.6897	400.4665	1502.376
高程位置第一组m	-0.0226	-0.3736	-1.6889	-39.8364	106.7117
高程位置第二组m	-0.0211	0.0239	0.0112	8.6194	17.1931
高程位置第三组m	-0.0286	-0.0178	0.1773	10.6379	42.0668
绝对值平均m	0.0241	0.138	0.6258	19.6979	55.323

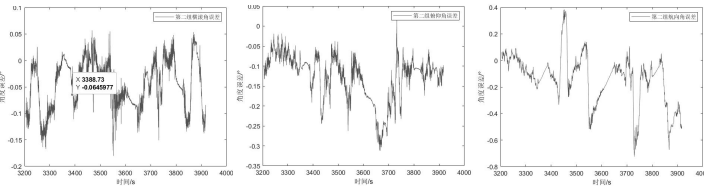
姿态误差曲线

条件A下的航姿误差曲线

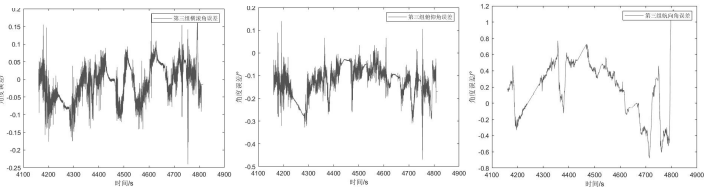
A条件第一组



A条件第二组

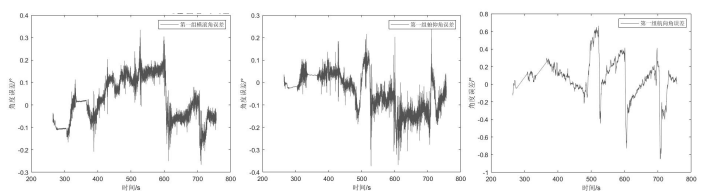


A条件第三组

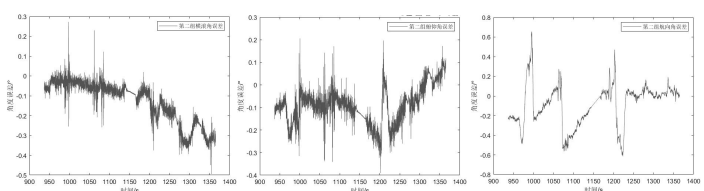


条件B下的航姿误差曲线

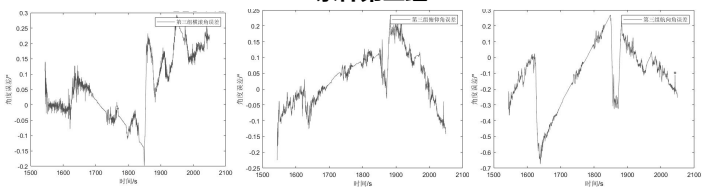
B条件第一组



B条件第二组

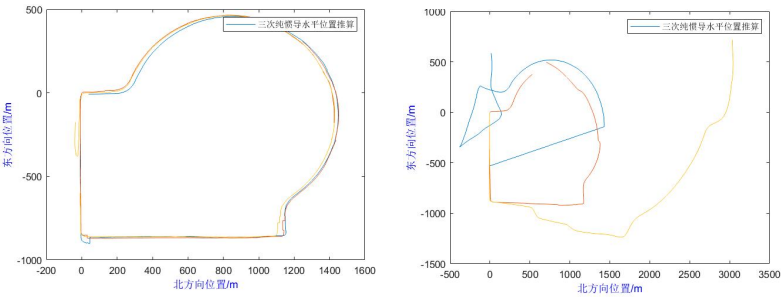


B条件第三组



结论

条件A和条件B跑车记录的水平位置推算轨迹



水平误差\总里程\测试条件	A	B
第一组	0.64%	34.12%
第二组	0.42%	9.68%
第三组	0.19%	48.19%
平均值	0.41%	30.66%

条件A(开启NHC滤波)车载模式					
GNSS失锁时间 间误差类型	10s	30s	60s	300s	终端时刻 2900-4000s
横滚°	0.01336	0.1118	0.0903	0.0436	0.1349
俯仰°	0.0896	0.0779	0.1048	0.0946	0.0968
航向°	0.03543	0.2569	0.3303	0.4922	0.9096
水平速度m/s	0.042	0.1662	0.4195	0.1718	0.1767
垂直速度m/s	0.0719	0.0197	0.0666	0.0638	0.04583
水平位置m	0.0333	1.3462	8.7755	11.1309	20.404
高程位置m	0.0335	0.1002	0.5286	2.5667	6.0746

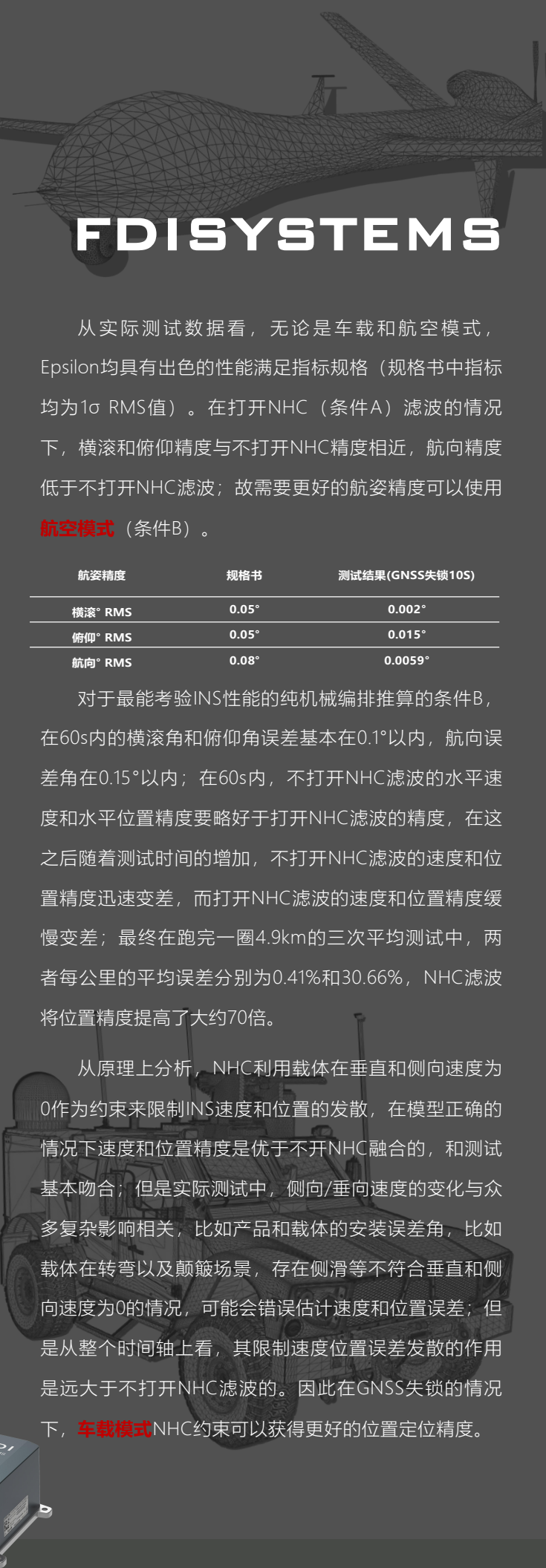
条件B(关闭NHC滤波)航空模式					
GNSS失锁时间 差类型	10s	30s	60s	300s	终端时刻 2900-4000s
横滚°	0.05466	0.05533	0.0273	0.1397	0.2047
俯仰°	0.0911	0.09056	0.1139	0.1410	0.1490
航向°	0.0215	0.1036	0.1320	0.3276	0.0797
水平速度m/s	0.0186	0.1083	0.2790	4.2224	9.2437
垂直速度m/s	0.00986	0.044	0.0316	0.1295	0.2482
水平位置m	0.0217	0.5732	4.6897	400.4665	1502.376
高程位置m	0.0241	0.138	0.6258	19.6979	55.323

NHC对导航误差影响

两种条件下导航误差平均值对比

旋转误差\条件	A	B	平动误差\条件	A	B
10s横滚误差°	0.01336	0.05466	10s水平速度误差m/s	0.042	0.0186
30s横滚误差°	0.1118	0.05533	30s水平速度误差m/s	0.1662	0.1083
60s横滚误差°	0.0903	0.0273	60s水平速度误差m/s	0.4195	0.2790
300s横滚误差°	0.0436	0.1397	300s水平速度误差m/s	0.1718	4.2224
最终横滚误差°	0.1349	0.2047	最终水平速度误差m/s	0.1767	9.2437
10s俯仰误差°	0.0896	0.0911	10s垂直速度误差m/s	0.0719	0.00986
30s俯仰误差°	0.0779	0.09056	30s垂直速度误差m/s	0.0197	0.044
60s俯仰误差°	0.1048	0.1139	60s垂直速度误差m/s	0.0666	0.0316
300s俯仰误差°	0.0946	0.1410	300s垂直速度误差m/s	0.0638	0.1295
最终俯仰误差°	0.0968	0.1490	最终垂直速度误差m/s	0.04583	0.2482
10s航向误差°	0.03543	0.0215	10s水平位置误差m	0.0333	0.0217
30s航向误差°	0.2569	0.1036	30s水平位置误差m	1.3462	0.5732
60s航向误差°	0.3303	0.1320	60s水平位置误差m	8.7755	4.6897
300s航向误差°	0.4922	0.1320	300s水平位置误差m	11.1309	400.4665
最终航向误差°	0.9096	0.3276	最终水平位置误差m	20.404	1502.376

本测试数据不做特殊说明测量值均为6σ 峰峰值。



FDISYSTEMS

从实际测试数据看，无论是车载和航空模式，Epsilon均具有出色的性能满足指标规格（规格书中指标均为1σ RMS值）。在打开NHC（条件A）滤波的情况下，横滚和俯仰精度与不打开NHC精度相近，航向精度低于不打开NHC滤波；故需要更好的航姿精度可以使用航空模式（条件B）。

航姿精度	规格书	测试结果(GNSS失锁10S)
横滚° RMS	0.05°	0.002°
俯仰° RMS	0.05°	0.015°
航向° RMS	0.08°	0.0059°

对于最能考验INS性能的纯机械编排推算的条件B，在60s内的横滚角和俯仰角误差基本在0.1°以内，航向误差角在0.15°以内；在60s内，不打开NHC滤波的水平速度和水平位置精度要略好于打开NHC滤波的精度，在这之后随着测试时间的增加，不打开NHC滤波的速度和位置精度迅速变差，而打开NHC滤波的速度和位置精度缓慢变差；最终在跑完一圈4.9km的三次平均测试中，两者每公里的平均误差分别为0.41%和30.66%，NHC滤波将位置精度提高了大约70倍。

从原理上分析，NHC利用载体在垂直和侧向速度为0作为约束来限制INS速度和位置的发散，在模型正确的情况下速度和位置精度是优于不开NHC融合的，和测试基本吻合；但是实际测试中，侧向/垂向速度的变化与众多复杂影响相关，比如产品和载体的安装误差角，比如载体在转弯以及颠簸场景，存在侧滑等不符合垂直和侧向速度为0的情况，可能会错误估计速度和位置误差；但是从整个时间轴上看，其限制速度位置误差发散的作用是远大于不打开NHC滤波的。因此在GNSS失锁的情况下，车载模式NHC约束可以获得更好的位置定位精度。

FDISYSTEMS

Your Partner in **Navigation** Systems.

安徽飞迪航空科技有限公司(FDIsystems)是使用最新MEMS传感器和GNSS技术的高性能惯性导航系统的领先开发和制造商。自2018年成立以来,为自动驾驶、军事、航空、海洋和工业机器人、教育等行业的系统集成商提供了针对SWaP-C约束优化的嵌入式导航解决方案。FDIsystems在多源信息融合和传感器校准技术方面拥有独特的专业知识。团队来自中国科大,在航空航天和海军舰艇应用领域有着多年的技术和研究经历。

FDIsystems是一家专注导航技术和产品的公司,产品包含惯性、卫星、视觉、激光雷达等导航系统。

FDIsystems Technologies

中国合肥市铭传路和永和路交叉口科大硅谷肥西园区B1栋501
230088,CN

tel **+86 15656549568**
 0551 - 67160686
Web **fdisystems.cn**
Sales **sales@fdisystems.cn**
 fdi.fdisystems.cn

© 2018 FDIsystems Technologies, LLC. All rights reserved. FDIsystems and the Diamond and Triangle logo are trademarks of FDIsystems Technologies, LLC. FDIsystems, Epsilon2 Series and Embedded Navigation Solutions are trademarks of FDIsystems Technologies, LLC. All other trademarks are the property of their respective owners. Specifications subject to change without notice.
Version 23-0320-R1

AS9100
CERTIFIED