

1	概述	1
1.1	组合导航的效果	1
1.2	导航技术发展历史*	2
1.3	组合导航的原理框架	4
1.4	组合导航系统的设计思路	5
2	惯性导航基础	6
2.1	简化的二维惯性导航	6
2.2	平台式和捷联式惯性导航*	7
2.3	常用的参考系	9
2.4	左手系和右手系#	10
3	姿态和坐标变换	11
3.1	向量的计算规律	11
3.2	Givens 矩阵	11
3.3	坐标变换的计算#	12
3.4	方向余弦矩阵	13
3.5	三维旋转演示实验	14
3.6	欧拉角	17
3.7	符号计算#	20
3.8	欧拉角的换算*	20
4	方向余弦矩阵姿态更新	22
4.1	用矩阵计算姿态更新	22
4.2	向量的叉乘#	24
4.3	推导反对称矩阵指数函数*	25
5	四元数	27
5.1	四元数姿态更新	27

5.2	四元数的换算	29
5.3	特征向量 [#]	30
5.4	轴角式旋转 [*]	31
5.5	乘法 [*]	32
5.6	共轭 [*]	34
5.7	四元数与旋转 [*]	35
5.8	四元数与惯性导航 [*]	36
6	简化版惯性导航	38
6.1	等效原理 [#]	38
6.2	简化版惯性导航	39
6.3	简化版惯性导航仿真程序	40
6.4	惯性导航的短期误差	42
7	惯性导航的细节讨论 [*]	45
7.1	采样过程的预积分 [*]	45
7.2	电流-频率转换电路 [*]	46
7.3	位置陀螺和速率陀螺 [*]	47
7.4	圆锥运动、旋转效应、划桨效应 [*]	48
7.5	采样率和减振 [*]	49
7.6	IMU 的安装方向 [*]	49
8	完整版惯性导航	51
8.1	地球模型	51
8.2	经纬度与 ECEF 坐标系转换 [*]	52
8.3	完整版惯性导航	53
8.4	姿态解析对准	55
8.5	惯性导航的精度设计	56
8.6	不同地理系的导航计算 [*]	57
8.7	舒勒振荡 [*]	58
8.8	极区导航 [*]	59
9	算法基础	61
9.1	最小二乘法 [#]	61
9.2	最小二乘法的推导 [*]	62
9.3	牛顿法解方程 [#]	62
9.4	非线性最小二乘法	64

9.5	随机变量的期望和方差 [#]	67
9.6	加权平均数 [#]	68
10	卡尔曼滤波	70
10.1	状态空间方程 [#]	70
10.2	卡尔曼滤波	71
10.3	卡尔曼滤波算例——自由落体	72
10.4	卡尔曼滤波的滞后性 [*]	74
10.5	扩展卡尔曼滤波	77
10.6	EKF 算例——单轴倾角仪	79
11	无线电导航和卫星导航简介	82
11.1	无线电导航概述	82
11.2	卫星导航概述	84
11.3	NMEA-0183 标准	85
11.4	异或计算 [#]	86
12	惯性卫星组合导航	87
12.1	简化版惯性卫星组合导航	87
12.2	简化版惯性卫星组合导航仿真程序	89
12.3	惯性卫星组合导航的种类	94
12.4	完整版惯性卫星组合导航	95
13	组合导航的细节讨论	99
13.1	卡尔曼滤波的进阶解释 [*]	99
13.2	EKF 正负号的定义	100
13.3	噪声系数矩阵 [*]	100
13.4	数据刷新率不一致 [*]	101
13.5	时间延迟的处理	102
13.6	位置观测与速度观测 [*]	103
13.7	外杆臂效应 [*]	103
13.8	组合导航与卫星导航的精度关系	104
13.9	卫星导航数据更新率对组合导航的影响 [*]	105
14	能观性分析	107
14.1	能观性概述 [*]	107
14.2	典型的运动过程	107
14.3	简化版惯性卫星组合导航的能观性 [*]	108

14.4	完整版惯性卫星组合导航的能观性*	109
14.5	卡尔曼滤波的维数*	110
15	组合导航实践	112
15.1	评估导航系统的精度	112
15.2	惯性导航实验	112
15.3	零速阻尼*	113
15.4	组合导航实验	114
15.5	卡尔曼滤波参数的人工调试*	114
15.6	嵌入式程序	115
16	IMU 的标定和性能表征	117
16.1	IMU 的标定	117
16.2	转台*	118
16.3	线性插值*	119
16.4	标定矩阵的 QR 分解*	119
16.5	内杆臂效应*	120
16.6	阿伦方差*	120
16.7	改善表观稳定性的方法*	128
16.8	传感器的性能参数	129
17	惯性传感器	130
17.1	力平衡加速度计	130
17.2	机械陀螺仪	131
17.3	光学陀螺仪	131
17.4	MEMS 传感器	133
18	动态倾角仪	134
18.1	动态倾角仪	134
18.2	拉普拉斯变换与传递函数*	135
18.3	基于互补滤波的倾角仪*	137
18.4	倾角仪仿真程序	139
19	姿态对准	143
19.1	初始对准概述	143
19.2	Wahba 问题*	144
19.3	精对准	144
19.4	陀螺寻北仪*	145

19.5	动态粗对准*	146
19.6	传递对准*	147
19.7	姿态匹配传递对准*	148
19.8	速度匹配与姿态匹配混合的传递对准*	149
19.9	传递对准中的时间同步*	150
19.10	互相关 [#]	151
20	观测速度	155
20.1	观测载体系速度	155
20.2	NHC	155
20.3	航位推算	156
20.4	纯里程计导航*	156
20.5	航位推算和 EKF 的对比*	157
20.6	车辆导航的细节讨论*	158
20.7	行人导航的零速修正*	159
21	观测距离	161
21.1	测距离的观测方程	161
21.2	惯性卫星紧组合*	161
21.3	基于测角的组合导航*	163
22	磁场	165
22.1	磁传感器的标定	165
22.2	梯度 [#]	166
22.3	地磁场*	167
22.4	磁传感器*	168
23	卫星信号	169
23.1	卫星导航进阶概述	169
23.2	基本的调制解调 [#]	169
23.3	相移键控*	172
23.4	测距码	173
23.5	Glod 码*	174
23.6	卫星信号的结构	177
23.7	导航卫星接收机的组成	177
24	导航电文	180
24.1	导航电文概述	180

24.2	D1 导航电文内容*	181
24.3	导航电文的校验码*	185
24.4	导航电文的二次编码*	186
25	卫星导航位置计算*	187
25.1	卫星位置*	187
25.2	时间修正*	190
25.3	电离层延迟*	191
25.4	对地球自转的补偿*	193
26	卫星导航的改进	195
26.1	卫星接收机的快速启动	195
26.2	差分增强	195
26.3	RTK 配置*	197
26.4	差分数据格式*	197
26.5	MSM 电文*	199
27	典型应用场景的导航方案	201
27.1	室内轮式机器人*	201
27.2	农用和矿用自动驾驶车辆	201
27.3	制导火箭	203
27.4	制导炮弹*	203
28	组合导航的发展方向	205
28.1	学术研究的发展方向	205
28.2	工程应用的发展方向	205
	附录 C 语言矩阵计算代码	207
	缩写对照表	216
	参考文献	218