

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.03.03

基于三轴转台的惯测组合最优标定方法研究

马知瑶¹, 周一览²

(1. 浙江同济科技职业学院 建筑工程系, 浙江 杭州 311231; 2. 浙江大学 先进技术研究院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 三轴转台是惯性测量单元模型系数标定的核心设备, 其综合指向误差会对标定测试造成影响, 会降低惯性测量单元的应用精度。基于黑箱分析法进行仿真分析和数据挖掘, 研究综合指向误差造成的测试误差规律, 并据此编排了基于 UOT 形式三轴转台的惯性测量组合最优分立式标定方法。该方法通过 24 个位置和 5 个初始状态下的 6 次转动测试, 在减少标定时间的基础上最大程度地抑制了标定误差, 标定精度显著优于传统标定方法, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 三轴转台; 惯性测量组合; 标定; 误差仿真

中图分类号: TB931; V241.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)03-0011-05

Research on the Optimal Calibration Method of IMU Based on Three-axis Turntable

MA Zhiyao¹, ZHOU Yilan²

(1. Department of Construction Engineering, Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China)

(2. Academy of Advanced Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The three-axis turntable is the key equipment of the model coefficient calibration of the inertial measurement unit. Its integrated pointing error will affect the calibration test and reduce the application accuracy of the inertial measurement unit. For practical engineering application, based on the black box analysis method, the simulation analysis and data mining are carried out, and the rule of test error caused by the integrated pointing error is studied. According to this, the optimal discrete calibration method of inertial measurement unit based on the UOT three-axis turntable is arranged. Through tests on 24 positions and 6 rotations of 5 initial states, the calibration error is restrained to the greatest extent with the shortest calibration time, and the calibration accuracy is significantly higher than the traditional method, which has important engineering application value.

Key words: three-axis turntable; inertial measurement unit; calibration; error simulation

0 引言

惯性测量组合在应用前必须经过标定来确定其模型系数, 标定精度对其应用精度产生直接影响^[1]。三轴转台是惯性系统标定测试的核心设备, 随着研制技术的进步, 其定位精度已达到角秒级, 速率精度和平稳性达到 10^{-6} 级, 但受加工、装配、安装精度以及负载不完全配平等因素的影响, 在使用时会产生多种程度不同且相互耦合的误差, 由此导致的综合指向误差会对标定测试造成影响^[2], 随着惯性系统精度的提升, 由转台误差造成的标定误差比例也相应增加, 不可忽略。

关于三轴转台在惯性系统标定测试中造成的工具误差, 李慧鹏等人分析了不正交度的影响^[3], 康跃然等人基于敏感度分析进行了关键误差源辨识^[4], 许琪琪等人分析了不水平度的影响^[5], 还有一些文献设计

了相关的标定方案^[6]。目前工程中广泛使用的惯组转台标定方法是分立式方法^[7], 即以转台为基准, 编排固定位置和转动过程, 采集惯组输出, 通过特定计算方法解算模型系数^[8-9]。文章基于黑箱方法进行仿真分析, 不对三轴转台各项误差源进行具体辨识和传播特性分析, 而是通过黑箱建模直接解析出转台综合指向误差造成的测试误差, 并在此基础上进行数据挖掘, 设计惯性测量组合的最优分立式标定方法。

1 惯性测量组合模型

惯性测量组合中包含 3 个光纤陀螺和 3 个加速度计, 输出模型为

$$\begin{bmatrix} Fx/Kgx \\ Fy/Kgy \\ Fz/Kgz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} EgXx & EgYx & EgZx \\ EgXy & EgYy & EgZy \\ EgXz & EgYz & EgZz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega X \\ \Omega Y \\ \Omega Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D0x \\ D0y \\ D0z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Jx/Kax \\ Jy/Kay \\ Jz/Kaz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} EaXx & EaYx & EaZx \\ EaXy & EaYy & EaZy \\ EaXz & EaYz & EaZz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} AX \\ AY \\ AZ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K0x \\ K0y \\ K0z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\Omega S, AS (S = X, Y, Z)$ 为载体各轴角速度和加速度; $Fs, Js (s = x, y, z)$ 为各轴陀螺和加表输出值; $Kgs, Kas (s = x, y, z)$ 为各轴陀螺和加表标度因数; $D0s, K0s (s = x, y, z)$ 为各轴陀螺和加表零偏; $EgSs, EaSs (S = X, Y, Z; s = x, y, z)$ 为各轴陀螺和加表安装误差。

2 三轴转台模型

三轴转台具有三个独立的转动轴, 按从外到内的顺序, 绕三个转动轴转动的框架(或台面)称为外框、中框和内框。常见的三轴转台有 UOT 和 UOO 两种形式, 如图 1 所示。

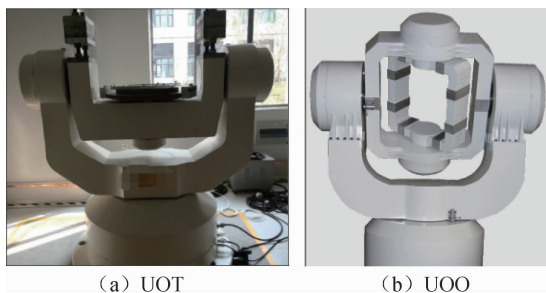


图 1 三轴转台

两种形式转台的主要区别是被测物的安装方式不同, 进而导致转台轴系和载体系的关系不同, 但可以使用同样的方法进行建模, 本文以 UOT 形式三轴转台为例进行分析。

记地理系为 t , 指向为东北天, 外框系为 o , 中框系为 m , 内框系为 i , Z_o 为外框转动轴, Y_m 为中框转动轴, Z_i 为内框转动轴, 理想状态下, 当三轴转台各框角度均为 0° 时, 上述 4 个坐标系为平行关系。

由于转台存在误差, 此时 o 系和 t 系并非平行, 将此时的外框系指向记为 o_0 , 记从 t 系到 o_0 系的转移矩阵为 $C_t^{o_0}$ 。外框顺时针转动 θ_o 角度后, o 系指向发生变化, 转移矩阵为

$$C_{o_0}^o = \begin{bmatrix} \cos\theta_o & -\sin\theta_o & 0 \\ \sin\theta_o & \cos\theta_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

同理, 记此时的中框系指向为 m_0 , 从 o 系到 m_0 系的转移矩阵为 $C_{m_0}^o$, 当中框顺时针转动 θ_m 角度后,

m 系的指向发生变化, 转移矩阵为

$$C_{m_0}^m = \begin{bmatrix} \cos\theta_m & 0 & \sin\theta_m \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_m & 0 & \cos\theta_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

记此时的内框系指向为 i_0 , 从 m 系到 i_0 系的转移矩阵为 $C_{i_0}^m$, 当内框顺时针转动 θ_i 角度后, i 系的指向发生变化, 转移矩阵为

$$C_{i_0}^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

惯性测量组合安装于内框上, 载体系 b 与内框系 i 重合, 至此可知地理系到载体系的转移矩阵为

$$C_t^b = C_{i_0}^i C_{m_0}^m C_{o_0}^o C_t^{o_0} \quad (5)$$

由于转台存在各项相互耦合的误差, 推导出 $C_t^{o_0}$, $C_{m_0}^o$ 和 $C_{i_0}^m$ 的解析式较为困难, 但可以直接根据坐标系旋转关系给出此 3 个矩阵的通用表达式

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\gamma & \cos\alpha \sin\gamma + \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma & -\sin\alpha \cos\beta \\ -\cos\beta \sin\gamma & \cos\beta \cos\gamma & \sin\beta \\ \sin\alpha \cos\gamma + \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma & \sin\alpha \sin\gamma - \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma & \cos\alpha \cos\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: α, β 和 γ 为 3 个欧拉角。

由此, 可将转台误差视为黑箱, 黑箱输出为 3 框各 3 个欧拉角, 后文称为黑箱角。对于状态确定的转台, 其综合指向误差中存在每次测试时不变的确定性误差和随机误差, 由于转台的位置和速率精度很高, 随机误差占比较小, 因此可以通过黑箱分析对确定性误差进行评估。具体而言, 给定特定的黑箱角, 通过数值仿真计算三轴转台特定位置以及转动过程中载体系的角速度和加速度数值, 再与不考虑转台误差时的理论值进行比较, 就可以分析转台误差造成的确定性误差特性, 并通过不同量级的黑箱角评估其一致性, 在此基础上通过数据挖掘编排最优标定方法, 可以达到限制转台误差, 提高标定精度的目的。

3 位置法标定

位置法标定是在若干个特定的位置采集陀螺和加表输出, 计算陀螺零偏和加表的零偏、标度因数和安装误差。最简方法是编排 6 个位置分别使得载体系各轴朝东、南、西、北、天、地 6 个正方向, 传统常用为 12 位置法。称载体系三轴均处于正方向的位置称为正位置, 为便于应用, 本文在三轴转台可实现的全部 64 个正位置中挖掘位置法的最优编排。

数值仿真分析结果表明, 随着黑箱角的增大, 各

模型系数的标定误差也相应增大,使用 64 位置综合计算的误差最小,但并不能完全消除误差。挖掘出的最优方法为 24 位置法,与以往文献给出的不同,其编排需要遵循内框对称原则,可以分为 12 组中框和外框角度不变,内框角度对称的位置。一共可以编排出 40 种最优 24 位置组合,表 1 给出了其中 1 种编排方式,为便于描述,表中按 12 组列出,其中三框角度格式为(外框,中框,[内框 1,内框 2])。

表 1 一种最优 24 位置

组	三框角度/(°)	载体系指向
1	(0, 0, [0, 180])	东北天, 西南天
2	(0, 90, [90, 270])	南天西, 北地西
3	(0, 180, [0, 180])	西北地, 东南地
4	(0, 270, [90, 270])	南地东, 北天东
5	(90, 90, [0, 180])	天东北, 地西北
6	(90, 270, [0, 180])	地东南, 天西南
7	(180, 0, [0, 180])	西南天, 东北天
8	(180, 90, [90, 270])	北天东, 南地东
9	(180, 180, [0, 180])	东南地, 西北地
10	(180, 270, [90, 270])	北地西, 南天西
11	(270, 90, [0, 180])	天西南, 地东南
12	(270, 270, [0, 180])	地西北, 天东北

表 2 列举了 3 种量级黑箱角下,本文编排的最优 24 位置法与传统 12 位置法的标定误差仿真结果,每种量级的黑箱角均进行 100 次蒙特卡洛模拟。鉴于篇幅所限,将陀螺零偏、加表零偏、加表标度因数和加表安装误差的标定误差取三轴平方和的平方根值作为综合误差进行对比。

表 2 位置法标定误差仿真结果

黑箱角均方根/(°)	系数综合误差	陀螺零偏/(°/h)	加表零偏/g ₀	加表标度因数	加表安装误差
26.7	最优法	1.20×10^{-7}	1.58×10^{-8}	1.00×10^{-7}	1.80×10^{-4}
	传统法	1.02×10^{-3}	2.03×10^{-4}	4.50×10^{-7}	3.51×10^{-4}
85.0	最优法	1.13×10^{-6}	1.49×10^{-7}	7.80×10^{-7}	5.61×10^{-4}
	传统法	2.68×10^{-3}	5.31×10^{-4}	1.30×10^{-6}	7.13×10^{-4}
275.5	最优法	1.38×10^{-5}	1.83×10^{-6}	5.24×10^{-6}	1.89×10^{-3}
	传统法	9.11×10^{-3}	1.80×10^{-3}	1.06×10^{-5}	3.54×10^{-3}

由表 2 仿真结果可知,本文方法的标定误差优于传统方法。值得说明的是,转台误差会造成较大的 $EaXy, EaYx$ 标定误差,且不能完全得到抑制。

4 转动法标定

转动法标定是在特定的转动过程中采集陀螺的输出,计算陀螺的标度因数和安装误差的标定方法。最简方法是传统常用方法,即调整中框和内框分别使得载体系各轴朝向天,分别逆时针和顺时针旋转外框。

转动开始时的状态称为初始状态,处于正位置的初始状态称为正初始状态,传统方法称为 3 态 6 转法。为便于应用,本文在三轴转台可以实现的全部 48 种正初始状态和 96 种转动中挖掘转动法的最优编排。

分析结果表明,随着黑箱角的增大,各模型系数的标定误差也相应增大,使用全部 96 次转动计算的误差最小,但并不能完全消除误差。可以通过 6 次转动实现最优效果,但与传统方法不同,X 和 Y 轴需要各选择 2 个初始状态,每个状态旋转 1 次,Z 轴只需选择 1 个初始状态进行正反转,称为 5 态 6 转法。一共可以编排出 32 种转动组合,抑制误差的效果相当,表 3 给出了其中 1 种编排方式,表中初始状态三框角度格式为(外框,中框,内框)。

表 3 一种最优转动法

次	初始状态三框角度/(°)	转动框及方向
1	(0, 90, 0)	外框, 逆时针
2	(0, 270, 180)	外框, 顺时针
3	(0, 90, 90)	外框, 逆时针
4	(0, 270, 270)	外框, 顺时针
5	(0, 0, 0)	内框, 逆时针
6	(0, 0, 0)	内框, 顺时针

表 4 列举了 3 种量级黑箱角下,本文编排的最优 5 态 6 转法与传统 3 态 6 转法的标定误差仿真结果,每种量级的黑箱角均进行 100 次蒙特卡洛模拟。鉴于篇幅所限,将陀螺标度因数和安装误差的标定误差取三轴平方和的平方根值作为综合误差进行对比。

表 4 转动法标定误差仿真结果

黑箱角均方根/(°)	系数综合误差	陀螺标度因数误差	陀螺安装误差
27.8	最优法	5.00×10^{-8}	1.89×10^{-4}
	传统法	2.80×10^{-7}	5.08×10^{-4}
83.1	最优法	3.20×10^{-7}	5.73×10^{-4}
	传统法	1.10×10^{-6}	1.23×10^{-3}
273.1	最优法	1.42×10^{-6}	1.90×10^{-3}
	传统法	6.61×10^{-6}	4.57×10^{-3}

由表 4 仿真结果可知, 本文方法的标定误差优于传统方法。值得说明的是, 转台误差会造成较大的 $EgXy, EgYx$ 标定误差, 且不能完全得到抑制。

5 实验验证

使用 UOT 形式三轴转台和光纤捷联惯性测量组合进行了实验, 惯性测量组合安装于三轴转台内框上, 当三轴转台三框角度均为 0° 时, 理论上惯组载体系指向东北天。惯性测量组合中的光纤陀螺稳定性为 $0.01 (^\circ)/h$, 加表稳定性为 $1 \times 10^{-6} g$ 。

5.1 转台误差验证

首先对转台综合指向误差进行验证, 假设转台综合指向误差不存在, 当中框角度为 0° , 即载体系 X 轴和 Y 轴在水平面内时, 无论外框和内框处于什么位置, 两个水平方向的加表输出均应不变。但由于转台误差的影响, 当中框角度为 0° , 外框和内框处于不同位置时, 水平方向加表输出仿真结果如图 2 所示。

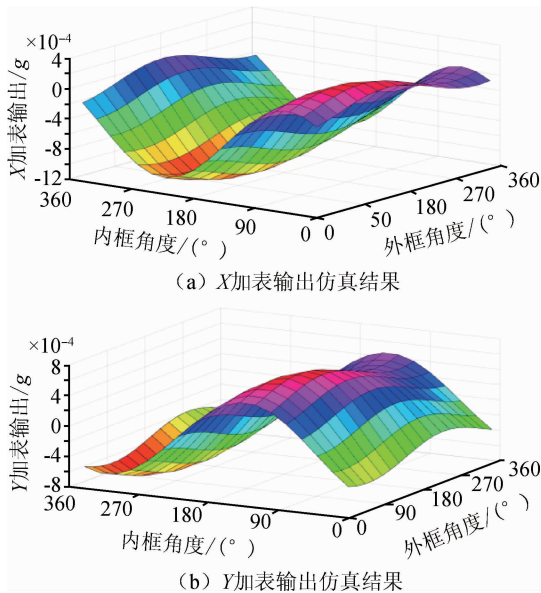


图 2 不同位置水平加表输出仿真结果

如图 2 可知, 当外框处于固定位置时, 转动内框, 水平加表的输出在一周内呈正弦形式波动, 不同的外框位置, 波动的幅值不同, 反之亦然。

保持中框角度为 0° , 各取 18 个内框位置和外框位置, 在 324 个组合位置上进行测试, 水平方向加表输出如图 3 所示。

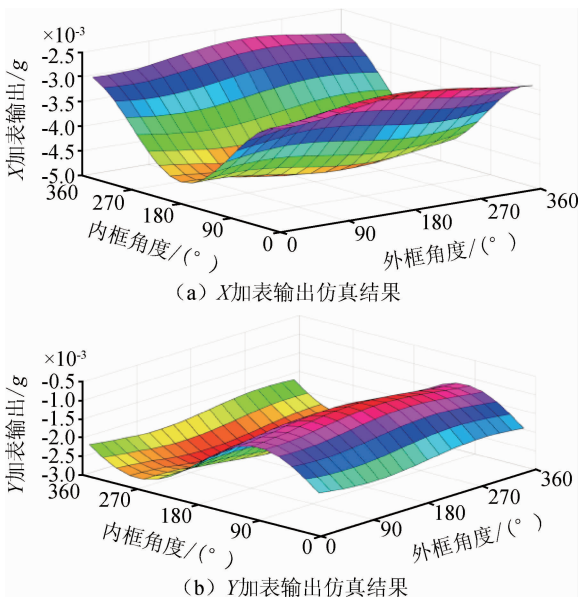


图 3 不同位置水平加表输出测试数据

实测数据与仿真结果一致, 且多次测试结果具有重复性, 通过实测数据的误差量级估算, 转台的外框误差角约为 $30''$, 而内框误差角超过 $100''$ 。以上实验结果说明转台综合指向误差中, 确定性误差占主要成分并具有重复性。

5.2 标定实验验证

采集本文所述的全部 64 个位置和 96 次转动的数据, 对比所提出的最优法和传统方法标定的模型系数与使用全部数据标定的模型系数的差异, 如表 5 所示, 实测数据与仿真结果符合, 最优法与全部数据标定的模型系数一致, 精度显著优于传统方法。

表 5 最优方法和传统方法标定结果比对

系数	$\sigma D0x/$ ($^\circ$)/h)	$\sigma D0/$ ($^\circ$)/h)	$\sigma D0z/$ ($^\circ$)/h)	σKgx	σKgy	σKgz	$\sigma K0x/$ g_0	$\sigma K0y/$ g_0	$\sigma K0z/$ g_0	σKax
最优法	0.0008	0.0014	0.0004	3.80×10^{-5}	4.90×10^{-7}	1.40×10^{-7}	1.44×10^{-8}	5.90×10^{-8}	3.96×10^{-8}	5.00×10^{-8}
传统法	0.0024	0.0059	0.0104	9.30×10^{-7}	1.04×10^{-6}	4.67×10^{-6}	1.85×10^{-6}	6.53×10^{-6}	8.29×10^{-4}	9.00×10^{-8}
系数	σKay	σKaz	$\sigma EaXx$	$\sigma EaXy$	$\sigma EaXz$	$\sigma EgYx$	$\sigma EgYy$	$\sigma EgYz$	$\sigma EgZx$	$\sigma EgZy$
最优法	1.30×10^{-7}	2.10×10^{-7}	5.57×10^{-7}	8.69×10^{-7}	7.82×10^{-7}	8.69×10^{-7}	1.38×10^{-7}	2.46×10^{-7}	2.34×10^{-7}	1.70×10^{-7}
传统法	2.10×10^{-7}	2.84×10^{-6}	5.68×10^{-5}	2.77×10^{-5}	9.60×10^{-4}	3.78×10^{-5}	2.59×10^{-7}	9.61×10^{-4}	9.57×10^{-4}	1.25×10^{-5}
系数	$\sigma EgZz$	$\sigma EaXx$	$\sigma EaXy$	$\sigma EaXz$	$\sigma EaYx$	$\sigma EaYy$	$\sigma EaYz$	$\sigma EaZx$	$\sigma EaZy$	$\sigma EaZz$
最优法	3.71×10^{-10}	1.35×10^{-9}	2.36×10^{-7}	6.71×10^{-9}	2.52×10^{-7}	7.53×10^{-10}	1.15×10^{-7}	1.74×10^{-7}	1.24×10^{-7}	1.72×10^{-10}
传统法	1.81×10^{-6}	1.49×10^{-7}	3.56×10^{-5}	3.85×10^{-7}	3.71×10^{-5}	1.13×10^{-7}	6.28×10^{-7}	9.58×10^{-4}	1.71×10^{-5}	6.53×10^{-10}

6 结论

基于黑箱分析方法,通过数值仿真和数据挖掘,对基于三轴转台的惯性测量组合分立式标定方法进行了优化,编排了便于应用的24位置和5态6转法,经实验验证,该方法与传统方法相比,抑制了转台误差对标定的影响,提高了标定精度,可以作为最优标定方法使用,具有重要的工程应用价值。

通过实验发现,实验用转台的综合指向误差达到分级,显著大于相应的转台指标量级。最优的标定方法只能实现最大程度的误差抑制,而不能完全消除误差,因此转台误差依然会导致标定结果存在误差,受影响最大的是 $EgXy, EgYx, EaXy$ 和 $EaYx$ 四项安装误差,这对惯性测量组合的动态性能会造成一定影响。负载的不完全配平可能是主要的被忽视的转台指向误差来源,还需要进一步深入分析验证。

参考文献

- [1] 赵雪米,张蕾,李四海.分立标定中捷联惯导标定参数间的关联性影响[J].计测技术,2019,39(3):34-40.
- [2] 胡梦纯,魏莉莉,傅长松.三轴转台误差对光纤捷联惯组陀螺标定精度的影响[J].上海航天,2015,32(5):60-64.
- [3] 李慧鹏,曹亚运,高爽,等.测试三轴转台误差分析及建模[J].导航与控制,2016,15(2):89-93.
- [4] 康跃然,傅亦源,刘鹏军,等.基于敏感度分析的三轴转台关键误差源辨识[J].组合机床与自动化加工技术,2019(4):49-52.
- [5] 许琪琪,刘巾杰,王谱华,等.转台不水平度误差对加速度计标定精度影响分析[J].南京航空航天大学学报,2019,51(S):63-67.
- [6] 董春梅,任顺清,陈希军.基于三轴转台误差分析的IMU标定方法[J].系统工程与电子技术,2016,38(4):895-901.
- [7] 魏莉莉,黄军,傅长松,等.带斜置元件的光纤陀螺捷联惯组标定方法[J].中国惯性技术学报,2015,23(1):14-19.
- [8] 马亚平,魏国,周庆东.改进的IMU传感器安装误差正交补偿方法[J].传感器与微系统,2016,35(9):9-13.
- [9] 郭云鹏,缪立军,舒晓武.三轴斜置一体化光纤陀螺测试技术研究[J].传感器与微系统,2017,36(12):22-24,27.

收稿日期:2020-05-24

基金项目:2018年度浙江省水利厅科技项目(RC1809)

作者简介



马知瑶(1983-),女,副教授,硕士。主要研究方向为工程管理信息化。2008年获浙江大学土木工程硕士学位,现任浙江同济科技职业学院工程造价专业部主任。第五届全国水利职教新星,浙江省高校“十三五”特色专业——工程造价专业负责人,浙江省“十三五”示范实训基地——工程管理实训基地负责人,2018年浙江省巾帼文明岗负责人,主持浙江省在线开放课程《建筑工程计量与计价》,主持省厅级课题5项,发表论文10余篇,主编教材4部。