

# 全站仪中间法高程测量及其精度探讨

刘惠明<sup>1</sup>, 张波<sup>2</sup>, 陈俊林<sup>1</sup>

(1 华南农业大学 信息学院, 广东 广州 510642; 2 华南农业大学 科技发展总公司, 广东 广州 510642)

**摘要:**通过对全站仪中间法高程测量方法的研究, 推导了全站仪中间法高程测量的公式, 并运用误差传播定律得出高程测量精度公式, 分析并计算了各因素对高程测量精度的影响. 通过实验验证, 认为在一定范围内全站仪代替水准仪进行高程测量可达到三、四等水准测量的要求, 并提出提高高程测量精度的几点建议.

**关键词:** 全站仪; 中间法高程测量; 误差; 精度

中图分类号: P224.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2004)04-0102-05

## Investigation into the accuracy of total station elevation surveying using the midway method

LIU Hui-ming<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>, CHEN Jun-lin<sup>1</sup>

(1 College of Information, South China Agric. Univ., Guangzhou 510642, China;

2 Technological Development Company, South China Agric. Univ. Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** An elevation survey calculation formula using the total station midway method was deduced. The error transmission principle was applied to derive the formula, and the impact of various factors on elevation survey accuracy were analyzed and calculated. Verified by experiments, it was confirmed that the total station could replace the water level in elevation measurements with the precision meeting the grade three and grade four specifications for water level surveying within certain ranges. Several proposals were presented to increase elevation surveying precision.

**Key words:** total station; elevation surveying using midway method; errors; precision

高程是根据一点的已知高程, 测定与另一点的高差, 然后算出另一点的高程<sup>[1]</sup>. 测定地面两点间高差常用的方法有水准测量、三角高程测量等. 水准测量精度虽然很高, 但一般适用于平坦地区, 在山区或高层建筑的控制点, 用水准测量的方法测定高差, 具有一定的难度. 三角高程测量通常是将经纬仪或全站仪安置在已知高程的测点上, 在待测点安置觇标牌, 量取仪器高和目标高, 采用单向观测法或对向观测法测定两点间的距离和竖直角, 按三角原理计算高差.

全站仪集测距、测角、测高程于一体, 其测距和测角精度大大提高, 使得全站仪在工程测量中的作用越来越重要. 尽管全站仪测距精度很高, 但仪器高和目标高即使用钢尺按斜量法或平量法获得, 其精

度约为  $\pm 2 \sim \pm 3 \text{ mm}^{[2]}$ , 仪器高和目标高的量取误差是不容忽视的, 而且它们是固定误差, 距离越短, 其对全站仪高程测量和测设的影响越显著<sup>[3]</sup>. 不管使用什么仪器, 要准确量取仪器中心到测站中心之间的高度是困难的, 因此, 通过量取仪器高的精度来提高高差测量精度是不现实的<sup>[4]</sup>.

## 1 全站仪中间法高程测量原理

如图 1, 在已知高程点  $A$  和待测点  $B$  上分别安置反光棱镜, 在  $A、B$  的大致中间位置选择与两点均通视的  $O$  点安置全站仪, 根据三角高程测量原理,  $O、A$  两点的高差  $h_1$  为:

$$h_1 = S_1 \sin \alpha_1 + c_1 - r_1 + i - v_1, \quad (1)$$

式中:  $S_1$ 、 $\alpha_1$ 、 $c_1$ 、 $r_1$  分别为  $O$  至  $A$  点的倾斜距离、竖直

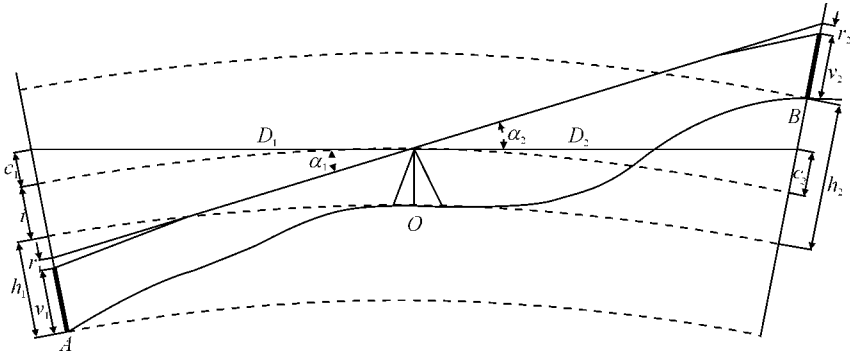


图 1 全站仪中间法高程测量原理

Fig. 1 Principles of elevation survey by total station using middle method

角、地球曲率改正数、大气折光改正数,  $i$  为仪器高,  $v_1$  为  $A$  点的目标高. 地球曲率与大气折光影响之和  $f_1$  为:

$$f_1 = c_1 - r_1 = \frac{S_1^2 \cos^2 \alpha_1}{2R} - \frac{K_1 S_1^2 \cos^2 \alpha_1}{2R} = \frac{1 - K_1}{2R} S_1^2 \cos^2 \alpha_1 \quad (2)$$

式中:  $R$  为地球的平均半径 ( $R = 6371 \text{ km}$ ),  $K_1$  为  $O$  至  $A$  的大气折光系数. 因此, 式(1)可表达为:

$$h_1 = S_1 \sin \alpha_1 + f_1 + i - v_1 = S_1 \sin \alpha_1 + \frac{1 - K_1}{2R} S_1^2 \cos^2 \alpha_1 + i - v_1 \quad (3)$$

同理可得  $O, B$  两点的高差  $h_2$  为:

$$h_2 = S_2 \sin \alpha_2 + f_2 + i - v_2 = S_2 \sin \alpha_2 + \frac{1 - K_2}{2R} S_2^2 \cos^2 \alpha_2 + i - v_2 \quad (4)$$

式中:  $S_2, \alpha_2, f_2, r_2, K_2$  分别为  $O$  至  $B$  点的倾斜距离、竖直角、地球曲率与大气折光影响之和及大气折光系数,  $i$  为仪器高,  $v_2$  为  $B$  点的目标高.  $A, B$  两点间的高差  $h$  为:

$$h = h_2 - h_1 = S_2 \sin \alpha_2 - S_1 \sin \alpha_1 + \frac{1 - K_2}{2R} S_2^2 \cos^2 \alpha_2 - \frac{1 - K_1}{2R} S_1^2 \cos^2 \alpha_1 + v_1 - v_2 \quad (5)$$

设已知点  $A$  的高程为  $H_A$ , 待求点  $B$  的高程为  $H_B$ , 则:

$$H_B = H_A + h = H_A + S_2 \sin \alpha_2 - S_1 \sin \alpha_1 + \frac{1 - K_2}{2R} S_2^2 \cos^2 \alpha_2 - \frac{1 - K_1}{2R} S_1^2 \cos^2 \alpha_1 + v_1 - v_2 \quad (6)$$

由上式可知, 在不考虑已知点高程误差的情况下, 采用中间法测量高程主要与测量斜距  $S_1$  和  $S_2$ 、竖直角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ 、目标高  $v_1$  和  $v_2$  及大气折光系数  $K_1$  和  $K_2$  有关, 与仪器高无关, 从而克服了仪器高量取精度低的问题, 有利于提高测量精度. 当  $A, B$  两点采用同一对中杆且不变换高度, 即  $v_1 = v_2$  时, 式(6)变为:

$$H_B = H_A + h = H_A + S_2 \sin \alpha_2 - S_1 \sin \alpha_1 + \frac{1 - K_2}{2R} S_2^2 \cos^2 \alpha_2 - \frac{1 - K_1}{2R} S_1^2 \cos^2 \alpha_1 \quad (7)$$

由上式可知, 采用适当的方法, 全站仪中间法高程测量与仪器高、目标高完全无关, 只与距离、竖直角及大气折光系数有关.

## 2 全站仪中点法测量高差的精度分析

### 2.1 全站仪中点法高程测量中误差

在不考虑已知点高程误差的情况下, 对式(5)进行全微分, 得:

$$dh = - \left[ \sin \alpha_1 + \frac{1 - K_1}{R} S_1 \cos^2 \alpha_1 \right] dS_1 + \left[ \sin \alpha_2 + \frac{1 - K_2}{R} S_2 \cos^2 \alpha_2 \right] dS_2 - \frac{1}{\rho} \left[ S_1 \cos \alpha_1 - \frac{1 - K_1}{R} S_1^2 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 \right] d\alpha_1 + \frac{1}{\rho} \left[ S_2 \cos \alpha_2 - \frac{1 - K_2}{R} S_2^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \right] d\alpha_2 - \frac{1}{2R} S_2^2 \cos^2 \alpha_2 dK_2 + \frac{1}{2R} S_1^2 \cos^2 \alpha_1 dK_1 + dv_1 - dv_2 \quad (8)$$

式中:  $\rho = 206265''$ , 考虑到当  $S_1 < 1000 \text{ m}, S_2 < 1000 \text{ m}$  时, 并且  $K$  值在我国东部地区约为  $0.09 \sim 0.13$  之间<sup>[3]</sup>,  $\frac{1 - K_1}{R} S_1 \cos^2 \alpha_1, \frac{1 - K_2}{R} S_2 \cos^2 \alpha_2, \frac{1 - K_1}{R} S_1^2 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1, \frac{1 - K_2}{R} S_2^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2$  的值很小, 可以忽略不计, 并设  $D_1 = S_1 \cos \alpha_1, D_2 = S_2 \cos \alpha_2, D_1, D_2$  分别为  $O$  至  $A, B$  的水平距离, 则式(8)可写成:

$$dh = - \sin \alpha_1 dS_1 + \sin \alpha_2 dS_2 - \frac{1}{\rho} D_1 d\alpha_1 + \frac{1}{\rho} D_2 d\alpha_2 - \frac{1}{2R} D_2^2 dK_2 + \frac{1}{2R} D_1^2 dK_1 + dv_1 - dv_2 \quad (9)$$

根据误差传播定律将式(9)转变为中误差关系式, 则式(9)变化为:

$$m_h^2 = \sin^2 \alpha_1 m_{S_1}^2 + \sin^2 \alpha_2 m_{S_2}^2 + \frac{1}{\rho^2} D_1^2 m_{\alpha_1}^2 + \frac{1}{\rho^2} D_2^2 m_{\alpha_2}^2 + \frac{1}{4R^2} D_2^4 m_{K_2}^2 + \frac{1}{4R^2} D_1^4 m_{K_1}^2 + m_{v_1}^2 + m_{v_2}^2, \quad (10)$$

大气折光系数  $K_1$  和  $K_2$  一般不相等, 要精确地测量出某一时间  $K$  的变化值是不可能的, 但在同一地点, 短时间内  $K$  值的变化很小<sup>[3]</sup>, 因观测几乎是在同样情况下进行的, 而且几乎是在同一时间内进行观测, 近似地假定  $K_1 \approx K_2$ , 并设  $m_{K_1} \approx m_{K_2} = m_K$ . 考虑全站仪的特点, 设边长的测量精度  $m_S$ 、角度的测量精度  $m_\alpha$  及目标高的量取精度  $m_v$  分别相等, 即  $m_{S_1}^2 = m_{S_2}^2 = m_S^2$ 、 $m_{\alpha_1}^2 = m_{\alpha_2}^2 = m_\alpha^2$ 、 $m_{v_1}^2 = m_{v_2}^2 = m_v^2$ . 式(10)可写成:

$$m_h = \pm \left[ (\sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_2) m_S^2 + \frac{D_1^2 + D_2^2}{\rho^2} m_\alpha^2 + \frac{D_2^4 + D_1^4}{4R^2} m_K^2 + 2m_v^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

式中:  $m_h$  为全站仪中间法高程测量中误差,  $m_S$ 、 $m_\alpha$  分别为全站仪测距、测角中误差,  $m_K$  为大气折光系数测定中误差,  $m_v$  为量取目标高中误差. 由式(11)可见, 全站仪中间法高程测量误差与仪器精度 ( $m_S$ 、 $m_\alpha$ )、大气折光误差  $m_K$  及目标高  $m_v$  量取误差有关.

式(11)即为考虑目标高量取误差时全站仪中间法高程测量的中误差.

同理, 对式(7)取全微分, 并转换成中误差关系式, 得:

$$m_h = \pm \left[ (\sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_2) m_S^2 + \frac{D_1^2 + D_2^2}{\rho^2} m_\alpha^2 + \frac{D_2^4 + D_1^4}{4R^2} m_K^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

式(12)为目标高相等时全站仪中间法高程测量的中误差.

### 2.2 全站仪中间法高程测量的极限误差

目前工程上常用的全站仪测距精度一般为  $\pm(1+1 \times 10^{-6}D) \sim (5+5 \times 10^{-6}D)$ mm ( $D$  为测距长度, 以 km 计), 测角精度一般为  $\pm 0.5'' \sim 6.0''$ . 仪器高和目标高的量取一般采用卷尺丈量, 当精度要求较高时, 则采用测杆量取, 而且要独立量取 2 次, 当 2 次量取的较差小于 2 mm 时, 取其平均值作为最终结果<sup>[9]</sup>. 以  $m_\alpha = \pm 2''$  的全站仪为例, 其测距精度一般为  $\pm(2+2 \times 10^{-6}D)$  mm, 在此, 取  $m_S = \pm 4$  mm, 即按全站仪到测点的测距 1 km 计算; 曾有试验证明, 折光系数的误差为  $\pm 0.03 \sim 0.05$ <sup>[7]</sup>, 在此, 取  $m_K = \pm 0.04$ , 分别计算公式(12)和公式(11), 即目标高相等时和考虑目标高量取误差时全站仪中间法高程测量的中误差, 并以  $\Delta = 2m_h$  即 2 倍中误差与三、四等水准测量的极限误差进行比较, 精度计算时取  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  中的最大者, 统一为  $\alpha$ , 结果见表 1 和表 2.

表 1 目标高相等时全站仪中间法高程测量的极限误差与三、四等水准测量极限误差的比较

Tab. 1 The comparing among limit errors of elevation surveying by total station using middle method and third & fourth order leveling at the same height of measured object

$(D_1 +  D_1 - D_2 )$ $D_2)/m$	/m	$\Delta = 2m_h / \text{mm}$							三等水准限差 $\pm 12 \sqrt{D}$	四等水准限差 $\pm 20 \sqrt{D}$
		1°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	third order leveling limit errors	fourth order leveling limit errors
200	0	2.75	2.92	3.37	4.01	4.74	5.51	7.13	5.36	8.94
	100	3.08	3.22	3.64	4.24	4.94	5.68	6.43		
400	0	5.50	5.58	5.84	6.23	6.72	7.28	7.89	7.59	12.65
	100	5.67	5.75	6.00	6.38	6.86	7.41	8.00		
600	0	8.27	8.32	8.50	8.77	9.13	9.55	10.02	9.30	15.49
	100	8.39	8.44	8.61	8.88	9.23	9.65	10.11		
700	0	9.66	9.71	9.86	10.09	10.41	10.78	11.19	10.04	16.73
	100	9.77	9.81	9.96	10.19	10.50	10.87	11.28		
800	0	11.06	11.11	11.23	11.44	11.72	12.05	12.42	10.73	17.89
	100	11.16	11.20	11.33	11.53	11.80	12.14	12.51		
1 000	0	13.89	13.93	14.03	14.20	14.42	14.49	15.00	12.00	20.00
	100	13.97	14.00	14.11	14.27	14.49	14.76	15.07		
1 500	0	21.17	21.19	21.26	21.37	21.52	21.70	21.91	14.70	24.49
	100	21.23	21.25	21.32	21.43	21.58	21.76	21.97		
1 800	0	25.71	25.73	25.78	25.88	26.00	26.15	26.32	16.10	26.82
	100	25.76	25.78	25.84	25.93	26.05	26.20	26.38		

表 2 考虑目标高量取误差时全站仪中间法高程测量的极限误差与三、四等水准测量限差的比较  
 Tab. 2 The comparing among limit errors of elevation surveying by total station using middle method and third & fourth order leveling when the errors of height measured of object are considered

$(D_1 +  D_1 - D_2 )$ $D_2)/m$		$\Delta = 2m_{\mu}/mm$							三等水准限差 $\pm 12\sqrt{D}$	四等水准限差 $\pm 20\sqrt{D}$
$/m$	$/m$	$1^\circ$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$	$25^\circ$	$30^\circ$	third order leveling limit errors	fourth order leveling limit errors
200	0	6.29	6.36	6.59	6.94	7.38	7.90	8.46	5.36	8.94
	100	6.65	6.72	6.94	7.27	7.69	8.19	8.73		
400	0	7.89	7.95	8.13	8.41	8.78	9.22	9.70	7.59	12.65
	100	8.01	8.07	8.25	8.53	8.89	9.33	9.80		
600	0	10.02	10.06	10.21	10.44	10.74	11.10	11.50	9.30	15.49
	100	10.12	10.17	10.30	10.53	10.83	11.19	11.59		
800	0	12.43	12.46	12.58	12.76	13.01	13.31	13.65	10.73	17.89
	100	12.51	12.55	12.66	12.85	13.09	13.39	13.73		
1 000	0	15.00	15.03	15.13	15.28	15.49	15.74	16.03	12.00	20.00
	100	15.07	15.10	15.20	15.35	15.56	15.81	16.10		
1 600	0	23.36	23.38	23.44	23.54	23.68	23.84	24.03	14.70	24.49
	100	23.42	23.44	23.50	23.60	23.73	23.90	24.09		
1 800	0	26.32	26.34	26.40	26.49	26.61	26.75	26.92	16.10	26.83
	100	26.38	26.40	26.45	26.54	26.66	26.81	26.98		

### 2.3 全站仪中间法高程测量的精度分析

通过表 1、表 2 的分析可知:

(1) 全站仪中间法高程测量的误差, 随着观测距离、竖直角增大而增大。

(2) 采用前后视目标高相等进行高程测量, 可以消除目标高量取误差的影响, 提高高程测量精度, 尤其是在观测距离较短的时候。

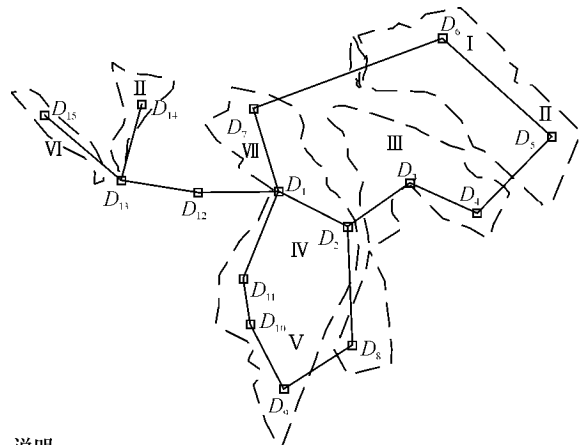
(3) 从表 1 可知, 前后视采用同一目标高, 以  $m_{\alpha} = \pm 2''$  全站仪的高程测量误差, 当仪器至前后视距离差即  $|D_1 - D_2| \leq 100$  m 时, 前后视距离总和在 1.8 km 范围内可以达到四等水准测量的限差要求; 当仪器至前后视等距离相等, 即  $D_1 - D_2 = 0$ , 竖直角  $\alpha \leq \pm 20^\circ$  时, 前后视距离总和在 600 m 以内, 可满足三等水准测量的限差要求。

(4) 从表 2 可知, 即使考虑目标高量取误差, 当仪器安置在前后视距离差即  $|D_1 - D_2| \leq 100$  m 时, 前后视距离总和在 1.6 km 范围内仍可达到四等水准测量的限差要求。

### 3 实例

2002 年, 为配合华南农业大学基地建设, 对学校教学基地进行测量, 待测面积约 135 hm<sup>2</sup>, 分成多个地块。控制测量的路线主要是闭合形式, 然后再进行测站加密, 在高程控制测量时, 如采用水准测量, 则外业工作量较大, 测站数也多, 也会使水准测量的精度不理想。笔者尝试用全站仪中间法进行高程测量, 即在两测点之间适当位置安置全站仪, 不量仪器高,

使用的全站仪是日本尼康 DTM-350 型, 距离精度为  $\pm(2+2 \times 10^{-6}D)$ mm, 垂直角观测精度为  $2''$ , 觇牌采用带支撑架的对中杆安置, 观测步骤为“后—前—前—后”, 读取水平距离和高差, 取盘左和盘右的平均数作为两点间的高差。视距长度一般在 350 m 以内, 最长 475 m, 前后视距差最大不超过 70 m。为检核观测成果, 整个观测路线构成了 2 个独立的闭合环和一条往返路线(支水准路线), 高程控制网示意图如图 2, 虚线所包围的区域为待测区域, 相邻控制点间用实线相连, 各路线的闭合差见表 3。从表 3 可看出, 所有的闭合差都达到四等水准测量的精度要求。



说明:  
 I: 试验田 test field; II: 实验基地 experiment base  
 III: 果苗基地 fruit tree seedling; IV: 树木园 forest tree garden  
 V: 惠华公司 huihua company; VI: 实习基地 practice base  
 VII: 桑园 mulberry garden

图 2 高程控制网示意图

Fig. 2 Illustration of vertical control network

表3 全站仪中间法高程测量成果表

Tab. 3 Chart of positive result in elevation survey by total station using middle method

测量路线 <sup>1)</sup> survey route	l(路线 route) / km	高差闭合差 closing error of different height/ mm	四等水准测量限差 limit errors of fourth order leveling/ mm	备注 remarks
D <sub>1</sub> -D <sub>2</sub> -D <sub>3</sub> -D <sub>4</sub> -D <sub>5</sub> -D <sub>6</sub> -D <sub>7</sub> -D <sub>1</sub>	3.61	23.17	38.00	闭合水准路线
D <sub>1</sub> -D <sub>2</sub> -D <sub>8</sub> -D <sub>9</sub> -D <sub>10</sub> -D <sub>11</sub> -D <sub>1</sub>	2.12	19.44	29.12	闭合水准路线
D <sub>1</sub> -D <sub>12</sub> -D <sub>13</sub> -D <sub>14</sub> -D <sub>15</sub> -D <sub>12</sub> -D <sub>1</sub>	1.16	12.65	21.54	支水准路线

## 4 结论与建议

采用全站仪中间法测量高程,相邻两测点可以不通视,可灵活选择测站位置,测站不需对中,不量仪器高,操作灵活、实用,节约大量测量时间并降低劳动强度,在作业特点上比全站仪对向观测法具有明显的优势,在一定范围内,其精度又可达到四等水准测量的要求,采用适当的方法使前后视目标高相等,还可满足三等水准测量的精度要求,尤其适用于测点不便安置仪器的地方及山区进行高程控制测量,为高程测量提供了一种快速高效的施测方法,为提高测量精度,应注意以下几点:

- (1)全站仪中间法高程测量前后视尽量采用同一目标高度。
- (2)高程测量精度与全站仪安置位置有关,实际工作中,全站仪尽量安置在两测点的中垂线附近。
- (3)若仪器测距精度低,可适当调节目标高度或

仪器位置,使竖直角变小,以减少测距精度的影响;若测角精度低,可选择合理的测站位置安置仪器,以减少测角精度的影响。

参考文献:

- [1] 顾孝烈,鲍峰,程孝军. 测量学[M]. 第2版. 上海:同济大学出版社,1999. 18.
- [2] 许国辉. 高精度EDM三角高程测量的研究[J]. 测绘通报,2002,(10):22-24.
- [3] 郭宗河. 用全站仪测量与测设高程的几个问题[J]. 测绘通报,2001,(12):39-40.
- [4] 何习平. 全站仪高差测量精度探讨[J]. 水电自动化与大坝监测,2002,26(2):29-32.
- [5] 周小华. 大高差单向光电三角高程测量中最佳测站位置的确定[J]. 华东地质学院学报,2002,25(1):44-46.
- [6] GB50026-1993 工程测量规范[S].
- [7] 陶海生. 全站仪应用于高程测量之精度探讨[J]. 中南公路工程,2003,28(3):59-61.

【责任编辑 李晓卉】

### 简讯

2004年7月本刊进行了编委换届调整,本届编委任期2年。根据我校学科发展情况,编委会对本刊栏目设置进行了调整,具体栏目如下:综述(只刊登国际、国内知名专家撰写的综述或特约稿),农学·园艺·土壤肥料(主要包括作物栽培学与耕作学、作物遗传育种、果树学、蔬菜学、茶学、土壤学、作物营养与施肥、农业环境保护),植物保护(主要包括植物病虫害的防治、研究等),生物学(主要包括植物学、植物生理学、昆虫学、生物化学、生态学、生物物理学、分子生物学等),林业科学(主要包括造林学、森林经理学、园林规划设计等),动物科学与兽医学(主要包括畜牧、兽医各学科、蚕桑学),农业工程与食品科学(主要包括农业机械化、农业系统工程及管理工程、农业机械设计与制造、木质材料科学与工程、食品科学等),信息科学(主要包括地理信息系统、土地规划与利用、计算机等),基础科学(主要包括数学、物理、化学等),简报。

华南农业大学学报编辑部