

绘图、计算。随着计算机技术的广泛应用，数据采集与处理的自动化技术引进我国之后普及发展，逐步实现了试验数据采集、数据处理、绘制曲线和打印成果的自动化。为减轻体力劳动，特别是对高压固结仪的需要，采用液压、气压加荷的固结仪应运而生。20世纪90年代中后期至今，气压固结仪与计算机技术相结合形成的全自动气压固结仪从无到有，并逐渐占领土工试验市场。

随着我国沿海地区经济蓬勃发展，港口码头、航道、海峡通道工程、滩涂圈围工程、海上筑岛等基础设施建设项目逐渐增多，离岸化发展趋势愈加明显，但目前市场上尚无适用于水运工程远洋船载试验环境且具有高精度、轻便性能的固结仪。为了改善水运工程的勘测精度及效率，研制了一种完全自主知识产权的船载智能化固结仪^[2]，打破了西方国家的技术壁垒。

1 固结仪种类

1.1 杠杆式固结仪

杠杆式固结仪采用杠杆原理获取较大的施加荷载，使得仪器设备体积庞大，加荷砝码质量大，当使用吊盘加载砝码时，船体不稳定产生严重晃动，且杠杆式固结仪自动化程度低，劳动强度大，加砝码时的冲击对试验结果会产生一定的影响。所以杠杆式固结仪不适用于水运工程船载实验室。

1.2 气压式固结仪

气压式固结仪采用气体作为压力源，加荷方便、操作简单，但是每台仪器只能由气压控制器统一施加相同的起始压力和荷重序列，如果某个土样出现异常需暂停试验时，同一台气压控制器其余通道的土样也必须暂停试验，为了获得稳定及快速的气源压力，则须配备一个大型的气源设备，既不方便运输携带，也影响固结仪的力源精度。因此，现有气压式固结仪不适用于水运工程船载实验室。

1.3 船载智能化固结仪

现有技术中的固结仪体积较大、智能化程度

低，均不适用于水运工程船载实验室。而水运工程船载智能化固结仪设备体积小、噪声低，操作简便、加压系统智能化、自动化程度高、测量精准度高且稳定，适应水运工程船载晃动的试验环境。

2 研发思路

2.1 试验原理

土的压缩性是土体在荷载作用下产生变形的特性。就室内试验而言，是土在荷载作用下孔隙体积逐渐变小的特性。土的室内固结试验的目的是在有侧限和两面排水条件下，通过各级垂直荷载下土的变形来测定土的压缩性指标^[3]，了解土的变形、压力、时间之间的关系；压力系统的稳定性和精准性直接决定了土样变形的精准性。船载智能化固结仪采用高精度的伺服系统作为压力源，为固结试验提供垂向压力，配置垂直缓冲装置，适时适量地补偿压力损失，保证垂直方向压力的稳定性，实现设备的智能化。

2.2 设计思路

在分析现有传统固结仪优缺点的基础上，新型船载智能化固结仪不仅满足常规实验室条件，还能最大程度地满足水运工程船载使用。设计采用计划、实施、检查、处理（PDCA）的循环流程不断检查改进，研发框架见图1。

新型船载智能化固结仪具有以下特点：1) 摒弃挂砝码加压方式，避免了砝码晃动甚至掉落的情况，确保加压稳定性，便于携带。2) 采用电缸升降进行加荷卸荷，不需要配备空气压缩机及繁琐的高压管路，占地面积小、噪声小且易于搬运。3) 压力缓冲机构可提高试验的精准性及设备的先进性，避免了压力的瞬时冲击力，从而达到保护土样的目的。4) 位移传感器固定，不需要反复装卸，节省了大量的操作时间，使试验变得高效便捷。5) 与气压式固结仪相比，同一套控制器下不同通道的船载智能化固结仪可采用不同的压力、时间序列进行固结试验，互不影响。

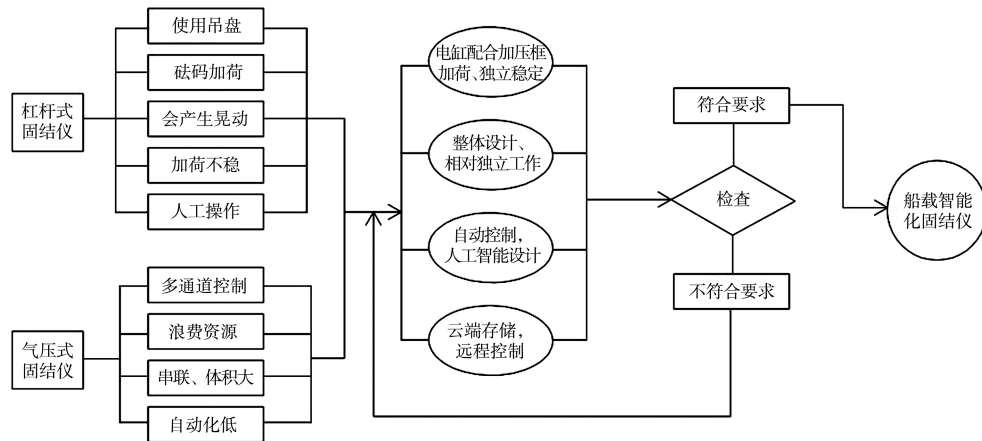


图 1 船载智能化固结仪研发框架

2.3 仪器设备

船载智能化固结仪主要由加荷装置、传递系统、压缩系统、量测系统组成，其结构见图 2。

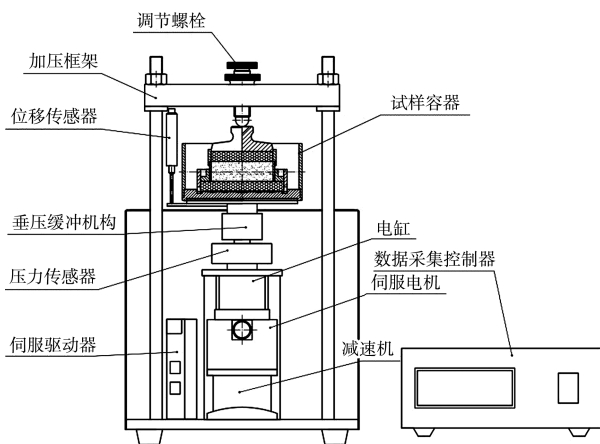


图 2 水运工程船载智能化固结仪结构

加荷装置由加压框架、位移传感器、力的缓冲装置、测力传感器、电缸、伺服电机、减速机、伺服驱动器组成。数据采集控制器发出命令至伺服驱动器带动伺服电机转动，通过减速机减速产生向上的推力，再由电缸将力传导至垂压缓冲机构，当土样发生压缩变形导致压力释放时，垂压缓冲机构储存的有限压力可给予实时适量补偿，保证压力稳定不变，同时避免土样受到冲击破坏。

伺服电机输出轴与连接杆相连，通过伺服电机驱动推杆移动，产生的推力传递至缓冲机构，压力稳定后再次将力传导至容器底部。

容器内加压盖与容器上方调节螺栓相连，伺服电机驱动推杆移动产生压力，当压力传至容器底部后，加压盖受加压框架的限位作用将压力传递至土样顶部，从而使土样产生压缩变形。

位移传感器的伸缩部分（即表针）直接与支架接触，位移传感器上端固定在加压框架上，当土体受力产生压缩变形时，传感器表针缩进，即可得到土样沉降量，数据采集系统可自动记录沉降量，并绘制出沉降量与时间、压力等的关系曲线，通过计算得出压缩系数、模量、压缩指数等各项力学性指标。

3 试验验证

3.1 比对试验

为验证船载智能化固结仪的性能，选用大连某海上勘察项目不同类别的土制备 6 组均质土样^[4]，并进行土的物理性质指标测试；每组均质土样各制备 3 件平行试样，分别采用杠杆式、气压式及船载智能化固结仪进行标准固结试验^[5]。固结试验加荷序列为：25、50、100、200、400、800 kPa；每级荷载间隔采用国标推荐时间序列；每级荷重采用 24 h 稳定标准。6 组试样物理性能试验结果见表 1，不同种类固结仪的试验结果比对见表 2。

表1 6组均质土样的物理性能试验结果

样品类别	含水率/%	初始密度/(t·m ³)	土粒比重	孔隙比	饱和度/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数
淤泥	59.3	1.66	2.74	1.629	99.7	48.5	26.4	22.1	1.49
淤泥质黏土	48.9	1.73	2.74	1.358	98.7	42.7	22.2	20.5	1.30
淤泥质粉质黏土	39.3	1.82	2.72	1.082	98.8	35.6	19.9	15.7	1.24
黏土	35.7	1.86	2.74	0.999	97.9	41.8	21.4	20.4	0.70
粉质黏土	30.2	1.92	2.72	0.845	97.2	33.3	18.5	14.8	0.79
粉土	24.6	2.01	2.70	0.674	98.5	27.1	19.7	7.4	0.66

表2 3种固结仪试验结果比对

土样类别	杠杆式固结仪		气压式固结仪		船载智能化固结仪	
	压缩系数/ MPa ⁻¹	固结系数/ (10 ⁻³ cm ² ·s ⁻¹)	压缩系数/ MPa ⁻¹	固结系数/ (10 ⁻³ cm ² ·s ⁻¹)	压缩系数/ MPa ⁻¹	固结系数/ (10 ⁻³ cm ² ·s ⁻¹)
淤泥	1.462	0.228	1.441	0.253	1.451	0.237
淤泥质黏土	1.202	0.332	1.243	0.312	1.227	0.321
淤泥质粉质黏土	0.893	2.257	0.864	2.371	0.878	2.332
黏土	0.736	2.76	0.731	2.639	0.744	2.813
粉质黏土	0.465	4.721	0.436	4.903	0.477	4.852
粉土	0.363	7.417	0.341	7.556	0.354	7.5

3.2 数据分析

表1包含了水运工程岩土勘察规范关于细粒土的所有类别^[6]，试样具有代表性。通过表2中压缩系数和固结系数数据，计算出土样在杠杆式、气压式及船载智能化固结仪3种设备试验下的相关系数，分别为0.9984、0.9993、0.9995和0.9994、0.9999、0.9996，说明3种设备试验结果相关性较强，试验数据偏差小且无趋势性漂移，试验结果准确、可靠。

4 结论

- 1) 船载智能化固结仪减小了设备体积，适用于水运工程船载实验室；
- 2) 船载智能化固结仪采用电缸升降进行荷载施加，精准且快速；
- 3) 船载智能化固结仪电缸施加荷载时增加力的缓冲装置，获得不同压力荷载的同时，达到维持精准稳定压力源的目的；
- 4) 船载智能化固结仪采用固定式位移传感器，减少频繁安装，大大提高工作效率及试验精度；
- 5) 船载智能化固结仪在同一套控制器下的不

同通道可进行不同压力、时间序列的固结试验，互不影响，大大提高试验效率；

6) 通过分析比对试验数据可知，船载智能化固结仪试验数据准确；

7) 船载智能化固结仪具有广阔的市场应用前景，特别适用于水运工程船载等移动类的土工实验室。

参考文献：

- [1] 李广信,张丙印,于玉贞.土力学[M].2版.北京:清华大学出版社,2013:127.
- [2] 刘磊,王镇,孙书科,等.固结仪:CN 216387053 U[P].2022-04-26.
- [3] 工程地质手册编委会.工程地质手册[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2018:156.
- [4] 刘永胜,胡伟娜.含水率对吹填超软土固结特性的影响[J].水运工程,2020(8):178-182.
- [5] 水利部水利水电规划设计总院,南京水利科学研究院.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [6] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司,长江航道规划设计研究院.水运工程岩土勘察规范:JTS 133—2013[S].北京:人民交通出版社,2013.

(本文编辑 赵娟)