

航空航天

基于多生理参数的空中交通管制员 认知负荷综合评估

王超 于超博*

(中国民航大学空中交通管理学院,天津 300300)

摘要 空中交通管制员认知负荷是其工作负荷的重要组成部分,将其科学地量化对全面评估管制员工作负荷提高扇区容量具有重要意义。从航空器数量、冲突点数量以及进离场比例三个因素综合考虑,设计不同的模拟管制实验,分析管制员在雷达管制的过程中各生理指标随认知负荷的变化关系。通过方差分析筛选出对认知负荷变化敏感的指标,建立BP神经网络模型并与NASA-TLX主观评估模型对比进行可行性检验,结果表现出较高的一致性。研究证明,航空器数量、冲突点数量以及进离场比例的变化会显著影响管制员的认知负荷。

关键词 认知负荷 多生理参数 空中交通管制员 神经网络

中图分类号 V355.2; **文献标志码** A

随着全球及各地区空中交通流量的迅速增长,使得空中交通管制员的工作量不断地增加,面临的压力也越来越大。研究表明空域容量很大程度上取决于管制员的工作负荷,所以,管制员的工作负荷大小决定了该空域的飞行容量。长期以来许多研究者在评估管制员工作负荷的时候只评估了客观(可观察的)负荷,而忽略了主观(认知)负荷。认知负荷不便进行记录和记时,难以量化,但却是重要的影响因素^[1]。过高的认知负荷将严重影响人的工作效率、操作可靠性和身心健康,进而影响整个人机系统的效率和可靠性^[2]。因此,对管制员认知负荷科学合理的量化研究对全面的评估管制员工作负荷具有重要意义,并且对于管制员的培训工作及工作制度设置也有一定的帮助作用。

认知负荷目前尚不能直接对其测量,只能用间接的方法对其进行评估。常用的评估方法有任务绩效测量、主观评定以及生理测量三大类。其中任务绩效测量又分为主任务测量和次任务测量。主任务测量是通过测定管制员完成指定作业的绩效来评估该作业的认知负荷。次任务测量采用双任务作业情景,要求管制员除执行主作业之外再完成一项额外的作业(次作业),通过考察双任务作业情景下次作

业绩效受影响的程度(相对于单任务情景)来间接评估主作业的认知负荷。主观评定是通过使用主观的等级制度让管制员根据紧张度、压力、操作难度等心理负荷进行主观判断,它是测量管制员认知负荷的最直接也是最常用的一种方法。目前主观评估方法有SWAT(subjective workload assessment technique)方法、NASA-TLX(national aeronautics and space administration traffic load index)方法、改进的NASA-TLX方法、ATWIT(air traffic workload input technique)和WAK(workload assessment keypad)方法及MCH(modified Copper-Harper)方法等。这些评估方法都要求设计适用于特定情形的问卷,通过管制员填写问卷完成评估工作。生理测量是通过测定管制员在进行指定作业过程中出现的生理反应来间接地评估认知负荷,常用的生理指标有瞳孔直径、注视持续时间、眼跳距离、注视频率、心率、心率变异性和皮肤电反应等。Hasan Ayaz, Ben Willems与2010年提出了用光电图的方法对管制员的认知负荷进行评估^[3]。美国林肯实验室的Kiran Lokhande和Hayley J. Davison Reynolds与2012年提出了视觉注意力分配技术在管制员认知负荷评估中的应用^[4]。一般认为,不同测评方法分别适用于不同的情景、不同的负荷水平范围。因此,利用多种参数对认知负荷作综合评估以替代基于单一技术或指标的评估是比较合理的;同时,认知负荷的多维度特性也决定了对其作综合评估的必要性^[5]。

2014年4月18日收到 国家自然科学基金(61039001)、
国家科技支撑计划(2011BAH24B08)、中央高校基本
科研业务费专项资金资助项目(3122011A002)资助
第一作者简介:王超(1971—),男,副教授,博士。研究方向:空中
交通系统仿真与分析。E-mail:wangch6972@aliyun.com。

1 管制员认知负荷定义

管制员的工作负荷可以分为2类:客观(可观察的)负荷和主观(认知理解的)负荷。客观负荷是指管制员进行常规管制工作、解决冲突过程中所进行的能够被观察记录和记时的工作负荷。管制员主观负荷,即认知负荷,是指管制员在短时间内接收、保持、加工飞机信息的“心理能量”的水平^[6]。主要体现在:管制员通过视觉和听觉,接收各种信息(如来自雷达显示终端、飞行进程单和陆空话音通讯的信息),产生相应的感觉。经过过滤,在控制系统的作用下,当前信息进入工作记忆,与长时记忆系统中的空管规则和经验相互作用,获得相应的意义。进行飞行冲突检测后,形成对当前交通态势的认知。进一步形成反应的决策,这种决策进入工作记忆导致外置的反应,就产生了管制行为^[7]。(图1)

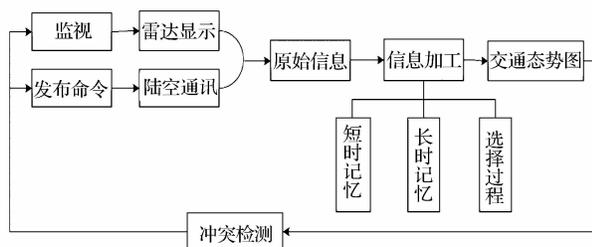


图1 空中交通管制工作的信息加工过程

Fig. 1 Information processing model of air traffic control

2 方法

2.1 被试

所有被试者均来至空中交通管制专业的10名学生,其中男生8名(占80%),女生2名占(20%)。年龄范围在21~25岁,平均年龄为22.7岁,标准差为1.636。所有被试者都对本实验的模拟机非常熟悉,并有一定的模拟管制经验。实验之前被试者均未参加激烈的体力运动,并且情绪稳定。

在本实验中,每个实验任务由2个被试者完成,一个是管制员,在雷达模拟机上发布管制指令,包括高度、航向、速度,从而保障空中交通安全顺畅运行;飞行员的任务就是在飞行员席位正确高效执行管制员指令。

2.2 实验装置

本实验在中国民航大学空管学院信息技术实验室的雷达模拟运行平台上进行,其中多路生理测量系统采用瑞典的Tobii-TX300眼动仪和神州津发公司开发的16导无线生理记录仪。被试者可以通过模拟机的键盘和鼠标以及陆空通话设备与飞行员进

行通话。实验装置如图2和图3所示。

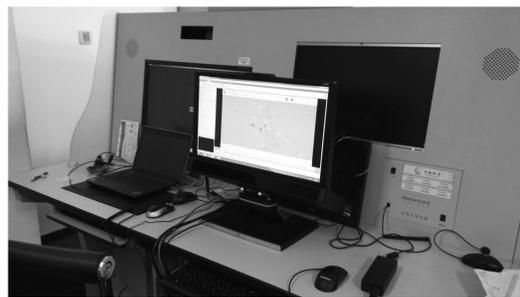


图2 Tobii-TX300眼动仪与雷达模拟运行平台

Fig. 2 Tobii-TX300 eye movement instrument and radar simulation platform

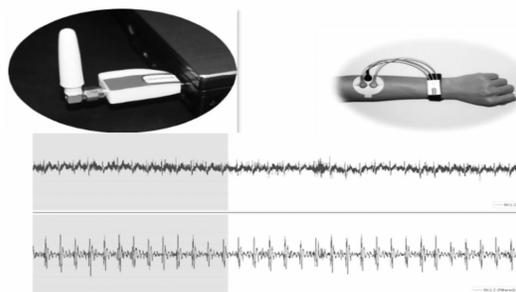


图3 16导无线生理记录仪

Fig. 3 16 wireless physiological recorder

2.3 实验设计

本实验采用天航创力开发一系列模拟管制软件编辑实验计划,管制场景为西安咸阳进近管制,跑道为05L(标高:470m),垂直能见度8000m,跑道视程1200m,温度20℃,气压1010Pa,风速5kt,风向180°,少云。

实验情景控制扇区内的冲突数量、航空器数量以及进离场比例的方法设计了5个管制情景,实验情景的具体设计参见表1。

表1 实验情景的参数设计

Table 1 The parameters of the experimental scenes

参数	情景1	情景2	情景3	情景4	情景5
航空器数量/(最多:架)	4	10	10	8	4
冲突点数量	0	0	4	4	0
进场航空器数量/架	0	8	8	6	4
离场航空器数量/架	4	2	2	2	0

2.4 实验步骤

2.4.1 实验引导与适应性管制

实验引导包括介绍整个实验流程,解释其中的每个步骤,安抚被试者,消除被试者疑虑。每位被试可在正式模拟管制实验之前进行两到三次适应性管制,以熟悉进离场程序,显控界面布局和管制操作。

2.4.2 管制技能测试

按照管制技能考核标准,对被试者实验操作的熟练程度以及实验前练习是否充分进行打分。满分十分,如果被试得分低于八分,就重新向被试讲解操作方法。

2.4.3 基准值测量

由于生理测量的个体差异性比较大,为了减少个体差异对本实验的干扰,每次模拟管制实验之前,先测量每个被试者在平稳状态下的各生理参数值,为数据处理的归一化处理做基准。

2.4.4 模拟管制实验

(1)启动系统运行控制软件、飞行员席位软件、管制员席位软件。

(2)等待被试者发出指令“开始”,生理参数采集系统开始采集数据。

(3)模拟管制任务完成后,生理参数采集系统停止记录。

(4)被试者针对刚刚的管制情景进行 NASA-TLX 主观测量。

3 数据的收集与整理

每一组实验完成后,收集和整理以下数据:注视持续时间、注视次数、眼跳距离和瞳孔直径;利用 Tobii 眼动仪记录眼动指标数据。

眼睛如果在较短的时间(100 ms)内稳定在一个相对的空间阈限范围内(1°),速度低于阈限($15 \sim 100^\circ/s$)记为一个注视点。注视持续时间代表着处理信息所花费的时间,反应的是获取信息的难易程度,即从所注视的目标上获取信息所用的时间。注视频率就是单位时间内的注视次数。研究表明认知负荷越大注视持续时间越短注视频率越大。每次注视时瞳孔的平均大小就是瞳孔直径用 P_d 表示,心理学研究表明,认知负荷的增加会导致瞳孔直径变大。

眼跳距离是指从一次注视结束开始转移到下一次注视之前眼睛跳跃的距离。眼跳距离是一个衡量注意深度的指标。如果一次注视能够获取很多信息,经过加工后,转移到下次注视时就要跳过较大的距离。如果一次注视仅能获取到有限的、很少的信息,则紧随其后的眼跳距离就会很小。心理学研究表明,认知负荷越大眼跳距离越小。

心率和心率变异性用 16 导无线生理记录仪测量。心率为每分钟心跳次数,用 H_r 表示。研究表明,随着认知负荷的增加,被试者的心率会显著增加。

心率变异性:心率变异(heart rate variability, HRV)是指窦性心率在一定时间内周期性改变的现象。Molder 的研究表明,随着认知负荷的增加,

HRV 会降低^[8]。常用的有 HRV 的时域分析和频域分析。NN 间期标准差(standard deviation of normal-to-normal beats, SDNN),单位为 ms。相邻 NN 间期差值的均方根(square root of the mean squared differences of successive NN intervals, RMSSD)。典型的频谱可有三个峰,大致位于 0.04 Hz 以下、0.05 ~ 0.15 Hz 和 >0.15 Hz,分别称为极低频(VLF)、低频(LF)和高频(HF)峰。研究表明,SDNN、RMSSD、VLF、HF 随认知负荷的增大而减小,LF 随认知负荷的增大而增大。

4 结果与分析

4.1 任务情景对认知负荷的影响

利用 SPSS 软件计算各个认知负荷评估指标在不同任务情景下的均值,并分别对各个指标在不同情景条件下的均值的差异性进行方差分析,结果见表 2。

表 2 各评估指标在不同情景条件下的均值及变化的方差分析

Table 2 Mean and variance of each evaluation index under different scenarios

评估指标	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5	F	P
注视持续时间/ms	718.19	558.56	468.54	498.69	631.51	4.836	0.002
注视频率/(次·s ⁻¹)	2.45	2.75	2.90	2.82	2.51	3.259	0.020
瞳孔直径/mm	3.89	4.14	4.24	4.21	4.00	2.57	0.044
眼跳距离/mm	116.60	123.01	107.98	101.93	104.54	2.313	0.072
心率/(次·min ⁻¹)	78.50	82.40	86.60	85.00	81.40	3.107	0.034
SDNN/ms	66.65	61.17	53.41	58.26	65.67	1.316	0.279
RMSSD/ms	48.49	41.51	35.63	38.48	44.22	3.421	0.016
LF/ms ²	596.94	1 068.37	1 489.65	1 343.40	849.16	2.857	0.048
HF/ms ²	215.02	484.48	375.73	449.35	293.00	0.893	0.476
LF/HF	3.67	3.24	10.15	4.03	5.92	1.114	0.362

从表 2 中的方差分析结果显示,在不同的任务情景下,注视持续时间、注视频率、瞳孔直径、心率、RMSSD、LF、均表现出显著的差异($p < 0.05$)。而眼跳距离、SDNN、HF 和 LF/HF 变化的差异不显著($p > 0.05$)。由此可见,对任务情景变化敏感的评估指标有注视持续时间、注视频率、瞳孔直径、心率、RMSSD、LF。

4.2 基于主观测量的认知负荷评估模型

NASA-TLX 是由 NASA(美国航空航天局)研究开发的一个多维度认知负荷评价量表,涉及到六个负荷维度(因素),即脑力需求、体力需求、时间需求、绩效水平、努力程度和受挫程度,每一维度由一条 20 等分的直线表示,直线分别以低/高字样标示。被试者在量表上与其认为的相符处划上记号,然后再将 6 个维度对总体认知负荷的贡献大小排

序(即确定权重)。即

$$workload = \frac{\sum_{i=1}^6 e_i w_i}{15} \quad (1)$$

式(1)中, e 表示 NASA-TLX 中的维度评分, w 表示该维度的权重评分。

图 4 是 NASA-TLX 认知负荷总得分图, 由图可知, 情景 3 的认知负荷明显高于情景 2, 情景 5 的认知负荷明显高于情景 1, 情景 3 和情景 4 认知负荷比较接近, 大部分被试(8/10)认为情景 3 的认知负荷大于情景 4。

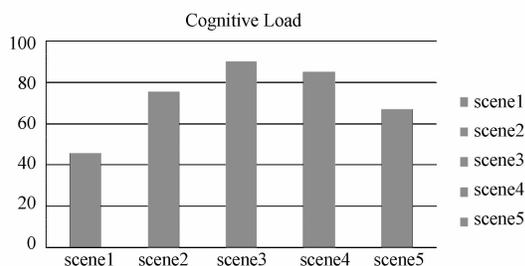


图 4 各个情景的 NASA-TLX 总认知负荷

Fig. 4 NASA TLX total cognitive load of each scene

4.3 基于 BP 网络的认知负荷综合评估模型

BP(back propagation) 网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络, 是目前应用最广泛的神经网络模型之一。BP 网络能学习和存贮大量的输入-输出模式映射关系, 而且无需事前揭示描述这种映射关系的数学方程。它的学习规则是使用最速下降法, 通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值, 使网络的误差平方和最小。BP 神经网络模型拓扑结构包括输入层(input)、隐层(hidden layer)和输出层(output layer)。由数据分析结果得知, 与认知负荷显著相关的因素有注视持续时间、注视频率、瞳孔直径、心率、RMSSD 以及 LF 共 6 个。因此, 输入项神经元个数设置为 6 个。输出神经元即为认知负荷的大小, 根据 NASA-TLX 测量结果, 对 BP 网络的输出项神经元进行对应。网络结构中的网络层数采用单隐层的三层网络, 根据初测结果, 隐层神经元个数选择 12 个, 隐含层传递函数采用 S 型的正切函数, 输出层传递函数采用 S 型的对数函数, 训练函数选择 trainlm 函数(Levenberg-Marquardt 算法), 期望收敛精度为 0.001。由于生理测量的个体差异性比较大, 为了减少个体差异对本实验的干扰, 对所有的数据进行归一化处理, 转化成实验测量的生理参数与平稳状态下的生理参数的比值的形式。随机选择 10 名被试中的 7 个共 42 组数据作为训练样本, 其余的 3 个被试共 18 组数据作为测试样本。利用

MATLAB 软件编制程序进行网络训练和测试。

选择主观测量负荷值与 BP 网络测试负荷值之间的绝对误差、相对误差作为网络模型的性能指标, 计算每个被试在每个实验情境下 BP 网络测试负荷值与主观测试负荷值的绝对误差、相对误差。结果见表 3。

表 3 认知负荷不同评估方法的偏差表
Table 3 Cognitive load deviation table of different evaluation methods

实验情景	主观测量负荷值	BP 网络测试负荷值	绝对误差	相对误差/%	
测试实验 1	scene1	46.33	43.17	3.16	6.83
	scene2	75.33	74.54	0.79	1.05
	scene3	91.00	94.35	3.35	3.68
	scene4	86.33	83.32	3.02	3.49
	scene5	67.00	62.19	4.81	7.18
测试实验 2	scene1	44.67	45.05	0.39	0.87
	scene2	76.67	72.05	4.62	6.02
	scene3	90.67	88.22	2.45	2.70
	scene4	84.67	86.46	1.79	2.12
	scene5	66.67	62.04	4.63	6.95
测试实验 3	scene1	46.67	44.45	2.21	4.74
	scene2	74.67	77.47	2.80	3.75
	scene3	91.27	91.80	0.54	0.59
	scene4	84.27	89.81	5.54	6.57
	scene5	68.67	77.19	8.52	12.41

表 3 显示, 两种认知负荷评估模型的偏差的平均值为 0.19, 方差 15.86, 标准差 3.98。虽然两种评估模型的评估结果有一定的偏差, 但是整体变化趋势基本一致。由相关性分析可知, 两种认知负荷评估模型的相关系数为 0.976, 有很强的相关性。

5 讨论

目前, 国内外对管制员认知负荷的研究还较少, 大多采用单一的指标或时间测量法来进行评估, 结果的可靠性不高。本研究采用实验法进行实时的测量管制员的生理参数, 并通过改变航空器数量进离场比例以及冲突点数量来控制认知负荷水平。结果显示注视持续时间、注视频率、瞳孔直径、RMSSD、LF 对认知负荷的变化有显著的敏感性。通过两种不同模型的评估方法, 研究各个因素对管制员认知负荷的影响。

5.1 冲突点数量

情景 2 和情景 3 航空器数量和进离场比例相同, 冲突点数量不同, 冲突点数量主效应显著, $F(1, 20) = 1532.67, p < 0.001$ 。结果表明: 在扇区内航空器数量和进离场比例一定的条件下, 随着冲突数量的增加, 管制员认知负荷显著增大。

5.2 航空器数量

情景 3 和情景 4 冲突点数量和进离场比例相同,航空器数量不同,航空器数量主效应显著, $F(1, 20) = 140.48, p < 0.001$ 。结果表明:在扇区内冲突数量和进离场比例一定的条件下,随着航空器数量的增加,管制员认知负荷显著增大。

5.3 进离场比例

情景 1 和情景 5 航空器数量相同,都无冲突点,情景 1 为 4 架离场航空器,情景 5 为 4 架进场航空器。进离场比例的主效应显著, $F(1, 20) = 2019.97, p < 0.001$ 。结果表明:在扇区内冲突数量和航空器数量一定的条件下,管制员在进场情景下的认知负荷显著高于离场情景下的认知负荷。

6 结论

本研究通过分析航空器数量、冲突点数量以及进离场比例与管制员认知负荷的关系,发现注视持续时间、注视频率、瞳孔直径、心率、RMSSD、LF 这六个指标对认知负荷变化具有较高的敏感性。以这六项指标的测量结果为依据,采用 BP 神经网络构建认知负荷综合评估模型,并与 NASA-TLX 评估量表测量的认知负荷进行对比,发现两种认知负荷评估模型具有较高的一致性。

研究证明,航空器数量、冲突点数量以及进离场比例的变化会显著影响管制员的认知负荷。这说明在评估管制员认知负荷时仅考虑扇区内航空器数量是不全面的,还应同时考虑到冲突点数量和进离场比例这两个指标才能显得更为科学。

参 考 文 献

- 1 卜 强. 管制工作负荷量化研究与应用. 空中交通管理, 2011; (3): 8—12
Bu Jiang. Controls work load of quantitative research and application. Journal of Air Traffic Management, 2011; (3): 8—12
- 2 李金波, 许百华. 人机交互过程中认知负荷的综合测评方法. 心理学报, 2009; 41(1): 35—43
Li Jinbo, Xu Baihua. Synthetic assessment of cognitive load in human-machine. Acta Psychologica Sinica, 2009; 41(1): 35—43
- 3 Ayaz H, Shewokis P A, Bunce S, et al. Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment. Neuroimage, 2012; 59(1): 36—47
- 4 Lokhande K, Reynolds H J D. Cognitive workload and visual attention analyses of the air traffic control tower flight data manager (TFDM) prototype demonstration. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Sage Publications, 2012; 56(1): 105—109
- 5 Ryu K, Myung R. Evaluation of mental workload with a combined measure based on physiological indices during a dual task of tracking and mental arithmetic. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005; 35(11): 991—1009
- 6 刘永欣, 聂润兔. 管制员工作负荷分析方法. 中国民航大学学报, 2007; 25(A01): 33—34
Liu Yongxin NIE Runtu. ATC workload analysis. Journal of China Civil Aviation University, 2007; 25(A01): 33—34
- 7 王 超, 项 恒. 基于空中交通态势认知的飞行冲突检测心理模型. 人类工效学, 2007; 13(2): 35—37
Wang Chao, Xiang Heng. Flight conflict detection based on air traffic situation cognitive psychology model. Journal of Human Ergonomics, 2007; 13(2): 35—37
- 8 Lamerichs J, Te Molder H F M. Computer-mediated communication; from a cognitive to a discursive model. New Media & Society, 2003; 5(4): 451—473
- 9 郭应时. 交通环境及驾驶经验对驾驶员眼动和工作负荷影响的研究. 西安: 长安大学, 2009
Guo Yingshi. Study on effects of traffic environment and driving experience on driver's eye movement and workload. Xi'an: Chang'an University, 2009
- 10 姚永杰. 军机飞行员空中脑力负荷的心理生理评定. 西安: 第四军医大学, 2007
Yao Yongjie. Mental workload assessment in military pilots using psychophysiological measures in flight. Xi'an: The Fourth Military Medical University, 2007
- 11 黄跃智. 用于认知过程的视力分配监测技术研究. 上海: 上海交通大学, 2012
Huang Yuezhi. Research on vision location monitoring technology for cognitive process. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012
- 12 Yang J, Zhang K. The impact of spatial ability on air traffic controller situation awareness and mental workload. Logistics@ s The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China. ASCE, 2008; 4460—4467

Air Traffic Controllers Cognitive Load Comprehensive Evaluation Based on the Multiple Physiological Parameter

WANG Chao, YU Chao-bo*

(Air Traffic Management College of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, P. R. China)

[**Abstract**] Controller's cognitive load is an important component of air traffic controllers' workload, evaluating the cognitive load quantitatively and scientifically is very important to evaluate the air traffic controllers' workload comprehensively and improve the capacity of airspace. Some different simulated control experiments based on the number of aircraft and conflict as well as the proportion between arrival and departure routes are designed, then analysed the relevance between physiological indicators and the change of cognitive load in the process of radar control. Variance analysis is used to get the indexes sensitive to changes in cognitive load, and establishes BP neural network model which is conducted feasibility test with NASA-TLX subjective assessment model, which shows a high consistency. Research proves that the change in the number of aircraft and conflict, the proportion between arrival and departure routes will influence the controller's cognitive load significantly.

[**Key words**] cognitive load multiple physiological parameter NASA-TLX artificial neural network300

(上接第 294 页)

Experiment Verification and Modal Analysis of Fluid-structure Coupling Liquid Tank under Various Boundaries

LIANG Bing-nan¹, YU Hong-liang^{1,2*}, CAI Yan-nian¹, YAN Jin²

(School of Marine Engineering, Dalian Maritime University¹, Dalian 116026, P. R. China;

School of Marine Engineering, Jimei University², Xiamen 361021, P. R. China)

[**Abstract**] The liquid tanks are installed in ships and offshore platforms. The impact of the liquid medium in liquid tanks and surrounding water on vibration performances of the hull should not be overlooked. The steel liquid tank as research object, a finite element mathematical model of Fluid-structure interaction(FSI) was established. The FSI dynamics in liquid tanks under different constraints is numerically simulated and analyzed with the FEM software ADINA. The study is carried out experimentally by adopting LMS structural mode analysis system, completing the vibration mode analysis of the tank when fluid loads happen in the internal and external of the tank. Inherent frequencies and modals of low-frequency-vibration under different boundary conditions and various liquid-filled heights through comparison were analyzed. The findings and methods can serve as reference for future research on fluid structure interaction.

[**Key words**] modal experiment natural frequency added mass FSI liquid tank finite element method