

龙升照 主编

人—机—环境系统工程 研究进展

(第二卷)



北京科学技术出版社

384950

人-机-环境系统工程研究进展

(第 二 卷)

龙 升 照 主 编

Research Advance for Man-Machine-
Environment Systems Engineering

Vol. 2

Chief Editor by Long Shengzhao



北京科学技术出版社

(京)新登字 207 号

内 容 提 要

人-机-环境系统工程是在著名科学家钱学森的亲自倡导下,于 1981 年在我国诞生的一门综合性边缘技术科学。本书全面地反映了人-机-环境系统工程理论及应用的最新研究成果,共收集论文 82 篇,主要包括人的特性的研究、机器特性的研究、环境特性的研究、人-机关系的研究、人-环关系的研究、机-环关系的研究、人-机-环境系统总体性能的研究和应用研究等 8 个部分,内容涉及航空、航天、航海、兵器、交通、冶金、管理等众多领域。本书对从事人-机-环境系统工程理论及应用研究的广大科技工作者、科技管理干部及大专院校师生都有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

人-机-环境系统工程研究进展/龙升照主编. —北京:北京科学技术出版社,1995. 7
ISBN 7-5304-1767-3

I. 人… II. 龙… III. 人-机系统-环境系统-系统工程-研究-进展 IV. TB18
中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 06991 号



北京科学技术出版社出版

(北京西直门南大街 16 号)

邮政编码 100035

新华书店经售

三河市腾飞胶印厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 22 印张 549 千字

1995 年 7 月第一版 1995 年 7 月第一次印刷

印数 1—1100 册

定价:35.00 元

钱学森同志

对《人-机-环境系统工程研究进展(第一卷)》的评语
(代序)

龙升照同志:

我收到您主编的《人机环境系统工程研究进展(第一卷)》,翻看了之后,感到非常高兴,1985年秋提出的一个想法,现在8年之后已赫然成书,500多页的巨卷!而且研究范围已大大超出原来航天,内容涉及航空、航天、航海、兵器、电子、能源、交通、电力、煤炭、冶金、体育、康复、管理……等领域!你们是在社会主义中国开创了这门重要现代科学技术!

此致

敬礼!

钱学森

1993.10.22

研究人机环境系统工程

为国防现代化服务

丁衡高
一九九三年
八月廿日

前 言

《人-机-环境系统工程研究进展(第一卷)》出版发行已经2年。现在,我们又将《人-机-环境系统工程研究进展(第二卷)》奉献给广大读者。

两年前,《人-机-环境系统工程研究进展(第一卷)》刚问世,我就将它呈送著名科学家钱学森同志,请他审阅、指正。钱学森同志对人-机-环境系统工程这门新兴科学和《人-机-环境系统工程研究进展(第一卷)》给予了极高评价。1993年10月22日,钱学森同志在给我的来信中指出:“我收到您主编的《人-机-环境系统工程研究进展(第一卷)》,翻看了之后,感到非常高兴,1985年秋提出的一个想法,现在8年之后已赫然成书,500多页的巨卷!而且研究范围已大大超出原来航天,内容及航空、航天、兵器、电子、能源、交通、电力、煤炭、冶金、体育、康复、管理……等领域!你们是在社会主义中国开创了这门重要现代科学技术!”钱学森同志的这段评语,对从事人-机-环境系统工程研究的广大科技工作者是莫大的鼓励和支持,我们深表敬意!《人-机-环境系统工程研究进展(第一卷)》的出版发行,对促进人-机-环境系统工程在我国的发展,起到了积极作用。

为了进一步推动人-机-环境系统工程更加广泛的应用和蓬勃的发展,中国系统工程学会人-机-环境系统工程专业委员会、国防科工委人-机-环境系统工程专业组和北京市海淀区人-机-环境系统工程研究会于今年8月在湖南张家界联合召开第二届全国人-机-环境系统工程学术会议。会议收到学术论文140余篇。我们从中精选出82篇比较优秀的论文编辑成《人-机-环境系统工程研究进展(第二卷)》。全书共分人的特性的研究、机器特性的研究、环境特性的研究、人-机关系的研究、人-环关系的研究、机-环关系的研究、人-机-环境系统总体性能的研究和应用研究等八个部分,内容涉及航空、航天、航海、兵器、电子、能源、交通、电力、冶金、管理……等众多领域,它全面反映了人-机-环境系统工程这门新兴科学在理论和应用方面的最新研究成果。但因篇幅所限,还有一些较好论文尚未收入本书,我们深表歉意。同时,由于文字加工比较粗疏,出版比较仓促,书中可能存在不妥之处,欢迎广大读者提出宝贵意见和建议。

在我国改革开放的新形势下,为了极大地提高我国生产力的水平,并满足市场经济和国际竞争的需求,就应该更加正确处理好人、工作机器和工作环境三者之间的关系。因此,可以深信,本书的出版发行,必将进一步推动人-机-环境系统工程理论及应用的蓬勃发展,并使其在四个现代化建设中做出更积极的贡献!

本书在出版过程中,得到北京科学技术出版社和三河腾飞印刷厂的大力支持,我们对此表示衷心感谢。

龙升照

1995年6月于北京

目 录

钱学森同志对《人-机-环境系统工程研究进展(第一卷)》的评语(代序)

国防科工委主任丁衡高同志的题词

前言

第一部分 人的特性的研究

1. 人的视觉注意力分配定量测试技术及其应用前景分析
..... 龙升照 王 丽 焦辛雨 王春慧 袁 进(1)
2. 灵敏度分析方法在生理系统建模中的应用 杨春信 徐向东 袁修干(5)
3. 呼吸系统的数学模拟(I-呼吸与循环系统建模) 杨春信 徐向东 袁修干(9)
4. 呼吸系统的数学模拟(II-呼吸系统的控制) 杨春信 徐向东 袁修干(13)
5. 人体冲击与人体代用品关系的研究—猕猴与人动态响应规律的研究
..... 成自龙 韩延方 王玉兰 范景连 姜俊成 赵 伟 曾文艺 刘来福(17)
6. 坦克乘员视听感觉知、反应能力及其运动准确性的实测研究
..... 阮宝湘 常克迅 孙远波 姚 忠(20)
7. 从驾驶心理看公路交通肇事 徐国忠(25)
8. 一种心理测试软件及其实验验证 孙英伟 张其吉(28)
9. 改善人的滤波特性提高人的工作能力 王 健(32)
10. 眼动测试与人机建模 郑 云 陈怀琛 熊汉春(37)
11. 人的基本能力的几点注记 熊大国(41)
12. 人员选拔及训练途径探索 阮仲皋(46)
13. 视野及相关要素的概念和应用 童时中 李志光 张铭续(49)
14. 工作负荷评价的方法论探讨 吴小林 孟宪东(53)
15. 人体系统自动控制原理初探 卢容德(57)
16. 人的三种数学模型的实验比较研究 钟秋海 付梦印(60)
17. 血液循环系统的调节模型 徐向东 杨春信 袁修干(65)
18. 血液循环系统的非调节模型 袁修干 徐向东 杨春信(69)
19. 人的行为与系统安全 徐向东 杨春信 袁修干(73)
20. 用于汽车碰撞研究的人体模型 信世强 周一鸣 谭德荣(77)
21. 机动车驾驶员驾驶适宜性综合评价方法的研究 毛恩荣 周一鸣(81)
22. 现代战争中我军军官能力结构模型的设计及分析 刘志忠(85)
23. 创新扩散中采纳行为的随机性与构模研究 官建成(89)
24. 飞行员通气过度生理训练效果的评价 周亚军 李全真 徐世南
..... 傅丽珊 吴祖宏 刘 莉 师秀玲 臧云宁 罗新民 董晓凤(93)
25. 不同工种保健操及其对人员素质影响的研究 张美荣 王百复 张秀芬(98)

26. 人的模糊可靠性分析及数学模型 胡东明 马云东 孙宝铮(103)
27. 追踪作业中几种心理负荷评估指标敏感性的研究 朱祖祥 张智君(106)
28. 神经网络中 BP 算法改进及其对生物医学信号的识别研究
..... 王殿元 龚至豪 陈 杰(110)
29. 用时间占有率测量脑力负荷 廖建桥(114)
30. 汽车驾驶员的速度估计能力和场依存性对其行车安全性的影响
张秀芬 张晓勤 任秀菊 毛恩荣 周一鸣 徐淑彦 王俊岭 黄清军 方文臣(119)
31. 可考虑组织和管理因素影响的人误概率计算方法
..... 高 佳 黄祥瑞 赵炳全 杨孟琢 王 法 罗安仁(124)
32. 模糊数学在人误应激水平研究中的应用 高 佳 黄祥瑞 杨孟琢(129)

第二部分 机器特性的研究

33. 被控对象动力学特性对人操作者手控跟踪效率的影响 姜国华 龙升照(135)
34. 井口电脑考勤系统的研究及应用 尹承常 王 波 马存江 陈瑞林(139)

第三部分 环境特性的研究

35. 湿法纤维板工业废水的污染与治理 夏元洲(143)
36. 舱外航天服生保系统 CO₂ 温度控制技术研究 林贵平 袁修干(148)
37. 密闭环境中二氧化碳的控制 陈根年(152)
38. 地铁环控系统主要设计标准的研究 田德水 褚敬止 袁修干(157)
39. 通用焓湿图的计算机模拟和工程应用 田德水 褚敬止 袁修干(161)
40. 人体冲击加速度在体测量方法 刘新祥 李国华 岳茂裕 白光荣(164)
41. 水下非接触爆炸时舰船-坐姿舰员系统仿真模型 刘新祥 刘建湖(167)
42. 某空气环境控制系统动态模型研究 刘博强 袁修干 李 敏(171)
43. 无氟太阳能空调系统技术经济性比较 袁卫星 袁修干(176)

第四部分 人-机关系的研究

44. 人与飞机的真正对话 刘宝善(180)
45. 用户模型在人机接口中的应用 陈 琪 余雄南(183)
46. 视觉界面对人-机系统特性影响的试验研究 屈香菊 王维军 方振平(188)
47. 屏幕仪表编辑器 龚杰民 李 炜 徐鑫炎 郑有材(193)
48. 关于计算机系统人-机界面的研究 石宇良(197)
49. 道路交通系统中信息传递与交流 高举成 于 翔 金耀先(199)
50. 用户界面设计要求与技术的多媒体工具 王坚(206)
51. 驾驶舱(室)布局设计中的计算机辅助可视性判定
..... 付世波 沈 翔 袁修干(211)

第五部分 人-环关系的研究

52. 装甲车辆噪声对乘载员听力的影响 王振国 郑建平(215)
53. 乙醇对大鼠红细胞膜荧光偏振的影响
..... 殷明 王近中 辛佩珠 薛建华 赵可明 项光强(219)
54. 护耳器的听力防护效果 詹道志 龚茂祥 林民生(221)
55. 电焊工眼部症状与电弧光晃眼次数的关系初探 赵宗群 叶康平 刘卫华(228)
56. 微波辐射与人体热调节 袁修干 徐向东 杨春信(229)
57. 热应激与个人防护 徐向东 程兴仁 滕金山(233)
58. 磁制冷应用于个体防护的可行性研究 陈荣山 袁修干(237)
59. 噪声的危害、现状及对策 李传光 韩秀苓 龚至豪(240)
60. 军用飞机氧气防护装备工程设计中的生理因素分析
..... 肖华军 驾登焰 袁修干(244)

第六部分 机-环关系的研究

61. 公路隧道环境与交通事故的有关因素分析 刘浩学 贾克亚(247)

第七部分 总体性能的研究

62. 从信息角度认识“人-机-环”系统 薛建华(251)
63. 故障树分析法在机车行车安全管理中的应用
..... 邹劲军 胡克勇 杜春生 杨存林 宋建忠(255)
64. 坦克人-机-环境系统模拟技术的研究 居乃俊(259)
65. Fuzzy 数学在人-机-环境系统工程研究中的应用(综述) 孙洪元(263)
66. 铁路行车安全人-机-环境系统分析 肖贵平 胡安洲(269)
67. 兵器操作原则 郭向元 林永炽 徐静良(272)
68. 人-机系统可靠性的预测和分配 韩明(275)
69. 用 Bayes 法对导弹武器系统总体可靠性的评价 郭韩良 徐耀华 姚德源(279)
70. 人-机-环境系统可靠性评价方法的研究 郑筱祥 黄文高 陈安良(283)
71. 大气扰动下人-机系统建模与仿真 方振平 范子强 屈香菊(286)
72. 基于复合信息空间的人-机-环境系统研究 郭仲伟 金以慧 高鹏翔(291)
73. 人-机系统的频域辨识 杜文启 付仁轩(296)
74. 坦克火控人-机半实物仿真系统的研制 付梦印 钟秋海(298)
75. 管理信息系统及其人、机、环境结构特点分析 谈凤奎 张广仁(301)

第八部分 应用研究

- 76. 唐山市5年间摩托车车祸流行病学研究 赵恩嘉 朱云龙 李会忠(306)
- 77. 人-机-环境系统工程在声乐教学中的应用 王 凡(311)
- 78. 人-机-环境系统工程与生产过程中的质量管理 靳爱国(314)
- 79. 冶金工厂设计——人-机-环境系统工程应用的又一广阔天地 周永康(321)
- 80. 情报人-机-环境系统工程基础研究 王以群(324)
- 81. 核电站安全性的人的因素研究——安全文化在核能界的应用 张 力(328)
- 82. 综采工作面人-机-环境系统可靠性研究 徐志胜 曹 琦 刘东明(331)

附录

- 1. 中国系统工程学会人-机-环境系统工程专业委员会第一届委员会成员名单 ... (339)
- 2. 中国系统工程学会人-机-环境系统工程专业委员会成立大会
暨第一届全国人-机-环境系统工程学术会议纪要 (340)

第一部分 人的特性的研究

人的视觉注意力分配定量测试技术及其应用前景分析

龙升照 王 丽 焦辛雨 王春慧 袁 进

(北京航天医学工程研究所)

一、引言

在任何一种人-机-环境系统中,作为工作主体的人,他总是通过五种感官(视觉、听觉、触觉、味觉、嗅觉)从周围世界获取信息,并根据这些信息来指导自己的行动。但在人的这五种感官中,视觉最为重要,因为大约 80% 的信息是用视觉获得。因此,了解人们如何利用视觉来获取信息就显得至关重要。通过测量人的眼注视点来实现人的视觉注意力分配测试,将为探索人类如何从视觉获取信息提供一种重要手段。所以,长期以来,眼注视点测量一直成为国内外有关学者所关注与研究的问题。本文将对人的视觉注意力分配定量测试技术的发展概况、功能实现进行阐述,并对其应用前景进行初步分析。

二、国内外发展概况

眼注视点的测量最早起源于 1898 年。B. Erdmans 与 R. Dodge 不用仪器设备进行观察测量,开辟了眼注视点测量的新纪元。随后, E. B. Delabarre^[1]和 E. BHuey^[2]采用机械记录,仿效记纹鼓记录肌肉运动的方法,发明了记录眼注视点的方法。后来, R. dodge^[3]发明了光记纹鼓,它是利用角膜反光的原理,摄影记录眼注视点的运动,此方法由于它的可利用性,故得到了许多发展。1931 年, M. A. Tinker^[4]用光记纹鼓,摄取双眼运动的图象,摄取横向与纵向运动的图象,并同时记录。1937 年,美国光学公司制造了简便的手提式“眼动针”。利用角膜反光也可拍成电影, H. F. Brant^[5]在 1940 年与 1945 年利用此方法研究一个人看一副广告时的眼注视点。1952 年, P. R. Wendt^[6]用同样方法研究被试看电影时眼注视点的运动。这之后,又有人发明了电流记录法及后像实验等。近几年,日本 NAC 公司经过不断的发展与研究,制造了性能优良的 EMR—600 眼注视记录仪。我国对眼注视点的测量虽然起步较晚,但也有越来越多的科技工作者从事这项工作^[7-9]。

人们在不断改善眼注视点测量方法的同时,还积极利用这些方法来探索其应用价值。例如,日本利用眼注视记录仪对汽车驾驶员在交叉路口左转弯时人的视觉注意力分配情况进行

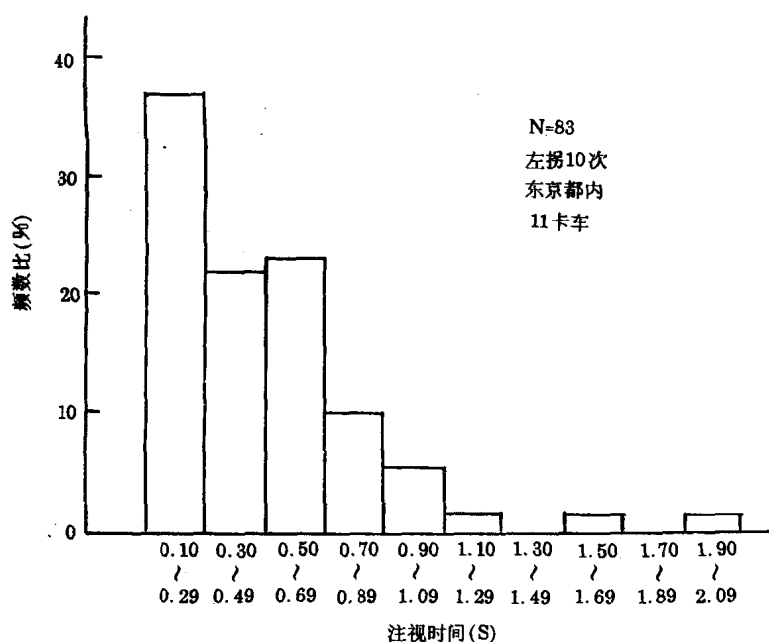


图1大型卡车左转弯时驾驶员注视时间的频度分布

了分析研究^[10],结果表明:汽车在交叉路口向左转弯时,驾驶员眼睛看什么地方,可以用眼注视记录仪进行视线分析。左转弯时,观察前面的车辆就占左转弯所需时间(约20—30s)的70%,观察反射镜占8%,观察信号灯占6%,观察行人占4%,观察逆行驶的车辆占4%,观察左侧占3%,观察路面为3%,观察标识为1%,其他占1%。由此可见,左转弯时,驾驶员并不能集中精力观察反射镜这一间接视界。对目视时间的分析表明,其频度分布如图1所示。从图中可以看出,人的反应时间80%在0.1—0.6s之间。

因此,如果通过增加反射镜来显示间接视界是困难的。这些结果为新型车辆的设计提供了科学依据。为了提高行车安全,必须设法增加直接视野,最根本的方法是对车辆的结构合理设计,而且在设计中应充分考虑人的视觉注意力分配情况。

三、测试技术的基本要求及其功能实现

人的视觉注意力分配定量测试技术的基本要求可概括以下五个方面:

1. 明确信息来源,也即了解人正在看什么;
2. 了解信息接收的顺序;
3. 在所接受的信息中,最关心的信息是什么;
4. 对所接收信息的关心程度(包括注视时间和注视次数);
5. 从接受一个信息转换到接受另一个信息的切换速度。

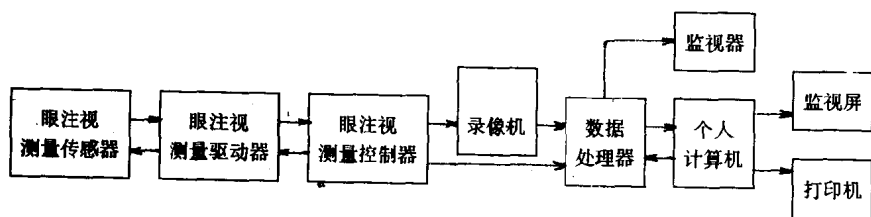


图2注意力分配定量测试系统框图

为了满足上述要求,我们以日本NAC公司的EMR-600眼注视记录仪为基础,再配以录像设备和微型计算机,构成一套具有90年代

先进水平的视觉注意力分配定量测试系统。该系统的基本组成如图 2 所示,本测试系统具有如下特点:

1. 眼注视传感器为头戴式,测量系统不受被试者头部运动的限制,而且被试者还可以自由活动,因而本系统可以离开实验室,广泛适用于现场或外场实验;

2. 测试系统能以“在线”(on-line)或“离线”(off-line)两种状态进行工作,当“在线”工作时,测量数据可不经录像机,直接向微型计算机传输,并对数据进行分析处理;当“离线”工作时,测量数据可先贮存在录像带上,对数据暂不进行处理。以后需要进行处理时,再将录像带上的数据重放,然后用计算机进行处理;

3. 测量精度高,其分辨率可达 0.17° ;

4. 测量视野可根据需要按 30° 、 60° 、 90° 加以改变。

本测试系统的主要性能可概括为三大类,共含九项基本功能(见图 3)。且每项功能都能对左眼或右眼的数据进行分析处理。现分项说明如下:

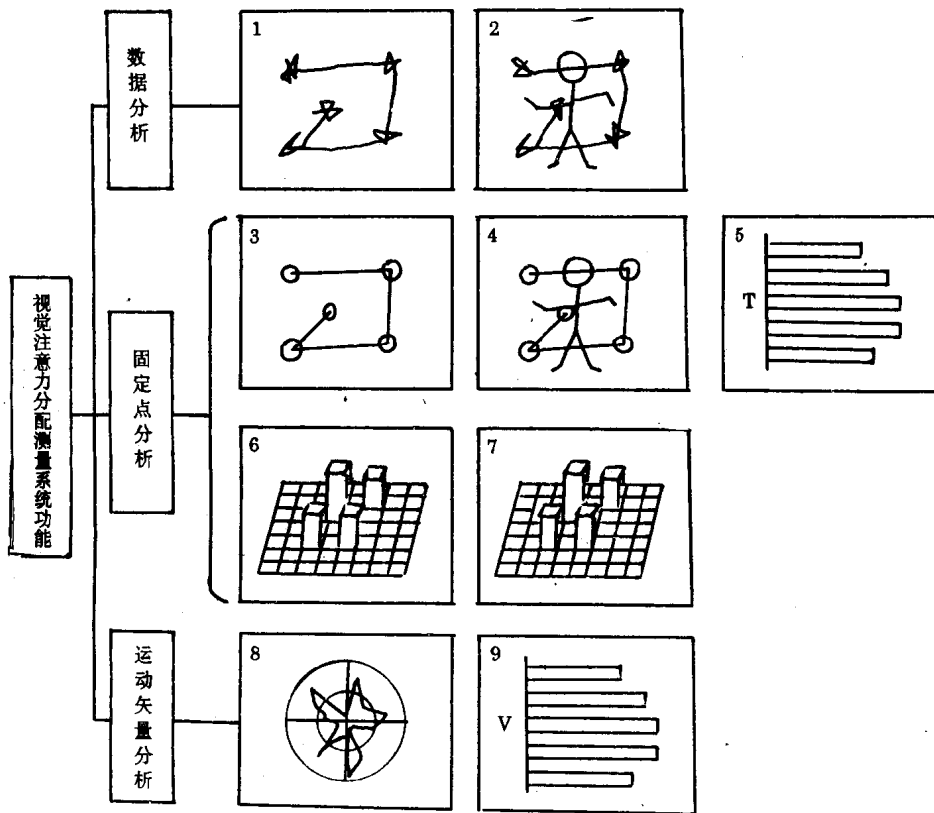


图 3 视觉注意力分配定量测试系统的基本功能

第一类:眼注视数据分析

1. 显示和打印眼注视点的轨迹曲线;
2. 在视野图象上叠加眼注视点轨迹曲线。

第二类:固定点分析

3. 以固定点形式,显示和打印眼注视点的轨迹曲线,并在该曲线上重叠圆圈。圆圈的大小

是以持续时间长短来确定的。因此,随着圆圈的扩大,表明在该点的持续时间增长,运动矢量线的颜色将按照它的速度而改变;

4. 将带有圆圈的眼注视点的轨迹曲线叠加在视野图上。同样,圆圈的大小代表了该固定点上持续时间长短。运动线的颜色代表了视点运动速度;

5. 用一个直方圆来表示固定点的持续时间,横坐标是频数的百分比,纵坐标是固定点持续时间的长短;

6. 用一个三维的立体直方图来表示固定点的密度分布,三维柱体越高,固定点的数量就越大;

7. 用一个三维立体直方图来表示注视点的持续时间。三维柱体越高,该注视点的持续时间就越长;

第三类:运动矢量分析

8. 用圆坐标来表示眼注视点的矢量运动方向分布情况。外圆代表频数的百分数;

9. 用直方图来表示眼注视点的运动速度分布情况。

总之,利用本测试系统,能对人的视觉注意力分配进行多方面的定量测试。

四、应用前景分析

根据以上的阐述可以看出,人的视觉注意力分配定量测试技术的应用领域将十分广泛。可以说,凡是有人参与的所有作业或过程,都涉及到人的视觉注意力的分配问题。因此,视觉注意力分配定量测试技术的应用前景将令人鼓舞。下面列举几个应用领域作简单说明。

1. 仪表布局分析及设计

火电站、核电站、火车……等部门的调度室、控制中心或总控台总有许多仪表需要作业人员监视;飞机、飞船、汽车、轮船……等仪表板上也有许多仪表需要操作人员监视。利用人的视觉注意力定量测试技术,就能对作业人员(或操作人员)观察仪表的路径进行分析,并合理布局各种仪表,使人的信息搜索路径最短、时间最快,从而提高作业人员的工作效率;

2. 作业分析

分析操作者在完成过程中人的注意力分配特点,找出作业过程中的薄弱环节,并有针对性地加以改进,从而提高作业工作效率;

3. 生产线上产品的合理布局

生产线上产品布局的疏密程度及输送快慢,直接影响产品检验人员的工作效率,通过分析生产线上检验人员的注意力分配特点,并调整产品的布局,可以大大提高生产线的工作效率;

4. 商场、商店销售的合理布局

利用视觉注意力定量测试技术,可以确定顾客进入商场或商店后,他最先看到的物品是什么,最关心的物品是什么,从而确定目前最畅销的商品,并将其客观存在放在最显眼的位置,以便提高销售水平;

5. 公路、铁路沿线路标、标志的合理布局

为了避免交通事故,在公路、铁路沿线都设置了许多标志,利用本测试技术,就能确定这些标志的布局是否合理,是否利于驾驶人员的快速识别。这些问题的解决,将利于交通事故的降低。

此外,视觉注意力分配定量测试技术还能用于视野确定、视功能分析、阅读评估……等众多领域。

参考文献

1. E. B. Delabarre. A mothod of recording eye—movements. Amer J Ps 9, 572—574. 1898.
2. E. B. Huey. The psychology and pedagogy of reading. N. Y. Macmillan. 1908.
3. R. Dodge. The angle velocity of eye—movements. Ps Rev 8, 145—157. 1901.
4. M. A. Tinker. Apparatuo for reording eye—movements. Amer J Ps 43, 115—118. 1931.
5. H. F. Brandt. Ocular patterns and their psychological implications. Ame J Ps 53, 260—268. 1940.
6. P. R. Wendt. Development of an eye camera for use with motion picture. Ps Monogr 66, #339. 1952.
7. 邱明华等,利用眼睛盯视实现人与计算机的交互作用. 见:龙升照主编. 人-机-环境系统工程研究进展(第一卷). 北京:科学技术出版社,1993. 281—285
8. 雍信阳等,眼动与人的控制行为模型. 见:龙升照主编. 人-机-环境系统工程研究进展(第一卷). 北京:科学技术出版社,1993. 25—28
9. 雍信阳等,基于红外摄像法眼动信号提取系统. 见:龙升照主编. 人-机-环境系统工程研究进展(第一卷). 北京:科学技术出版社,1993. 28—31
10. 浅居喜带治. 现代人间工学概论. オーム社,1980.

灵敏度分析方法在生理系统建模中的应用

杨春信 徐向东 袁修干

(北京航空航天大学人-机-环境系统工程研究所)

一、引言

灵敏度分析是研究系统参数变化对系统性能影响的方法,这一方法主要应用于技术控制系统,如自适应控制等。与技术系统相比,生理系统的参数往往是时变的,而且由于测量手段的限制,一般难以精确地测定参数值。所以,分析参数对生理系统的影响在生理系统的建模和计算机仿真中有重要作用。具体地说,应用灵敏度分析方法可为系统分析提供有用的信息,例如:

- (1)定量地比较不同参数值对系统变量的相对影响;
- (2)确定任意参数和变量之间的相对关系;
- (3)决定两个或多个参数对系统模型特性的交互影响;
- (4)可以用简单的线性模型确定参数集合受到扰动时系统变量的影响,而不必采用耗时的模拟计算;
- (5)判断系统模型的合理性而不需要对实际系统进行大量的测量;
- (6)揭示所有参数对模型总体性能的影响,而这些特性仅仅依赖特定的实验情况是得不到的;
- (7)得到模型中所有参数的相对重要性,以进行参数预估和稳定性分析;
- (8)根据输入参数的不确定性预估模型输出的不确定性;

(9)分析和比较描述同一物理或生理系统的两个不同模型之间的差异。

灵敏度方法尤其适用于模型的早期发展阶段,因为它不需要广泛收集实验参数来直接验证模型的结果,而是通过分析模型参数的相对重要性来定性验证模型,并为设计模型的验证性实验提供信息。本文举例说明这一方面的应用。

二、灵敏度分析方法

灵敏度分析方法的基本思想非常简单。令系统参数有一微扰动,观察这些参数变化对解的影响,计算灵敏度函数描述上述效应,从而为分析系统动态特性提供信息。用灵敏度分析方法得到的信息往往是依靠简单求解方法得不到的。

以二阶系统为例: $F(\ddot{y}, \dot{y}, y, t, q) = 0$ (1)

式中 y 为变量, q 为参数。

(1)式解的形式为:

$$\dot{y} = y(t, q) \quad (2)$$

此外,由(1)(2)式知, q 增加 Δq 时,有:

$$y = y(t, q + \Delta q) \quad (3)$$

则可定义灵敏度函数为:

$$S = \frac{\text{输出的变化}}{\text{输入的变化}} = \frac{\Delta y}{\Delta q} = \frac{y(t, q + \Delta q) - y(t, q)}{\Delta q} \quad (4)$$

显然,根据(4)式有:

$$\lim_{\Delta q \rightarrow 0} \Delta S = S(t, q) = \frac{\partial y(t, q)}{\partial q} \quad (5)$$

由(4)式有:

$$\Delta y = S(t, q) \Delta q \quad (6)$$

显然,如果求出了灵敏度系数,则可以用简单的代数方程确定当参数变化时系统的变化。为确定灵敏度函数,当系统动态方程已知时,可以建立灵敏度方程。由(1)式可知:

$$\frac{dF}{dq} = \frac{\partial F}{\partial \ddot{y}} \frac{\partial \ddot{y}}{\partial q} + \frac{\partial F}{\partial \dot{y}} \frac{\partial \dot{y}}{\partial q} + \frac{\partial F}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial q} + \frac{\partial F}{\partial q} = 0 \quad (7)$$

注意到:

$$\frac{\partial \dot{y}}{\partial q} = \frac{\partial \left[\frac{\partial y}{\partial q} \right]}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial t} = \dot{S} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \ddot{y}}{\partial q} = \frac{\partial^2 \left[\frac{\partial y}{\partial q} \right]}{\partial t^2} = \ddot{S} \quad (9)$$

于是(7)式可写为:

$$\frac{\partial F}{\partial \ddot{y}} \ddot{S} + \frac{\partial F}{\partial \dot{y}} \dot{S} + \frac{\partial F}{\partial y} S = - \frac{\partial F}{\partial q} \quad S(0) = 0 \quad (10)$$

(10)式即动态系统的灵敏度方程,它一般是线性的。上述讨论可推广到多变量、多参数系统。记变量数为 n 个,参数为 m 个,则有 $m \times n$ 个灵敏度系统数:

$$S_{ij}(t) = \frac{\partial y_i(t)}{\partial q_j} \quad (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m) \quad (11)$$

同样可以得到:

$$\Delta y(\Delta q_1, \dots, \Delta q_m) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{y}{q_i}\right) \Delta q_i = \sum_{i=1}^m S_i \Delta q_i \Delta \Delta \quad (12)$$

对于这种大尺度方程,一般用数值求解,因而灵敏度系数是离散的。在实际应用中更广泛的是对数灵敏度,其定义为:

$$\bar{S}_j = \frac{\delta \ln y}{\delta \ln q_j} = \frac{\delta y/y}{\delta q_j/q_j} = S_i \left[\frac{q_i}{y} \right] = \frac{\Delta y/y}{\Delta q_j/q_j} \quad (13)$$

或:

$$\frac{\Delta y}{y} = \bar{S}_j \frac{\Delta q_j}{q_j} \quad (14)$$

三、在生理系统建模中的应用

我们以人体在加速度应激下的耐受时间的数学模型为例说明灵敏度分析在生理系统建模中的应用。

研究人体对加速度的耐受时间对于防止飞行员过载引起的视觉和意识丧失、研制高效防护手段有重要意义。这方面的研究中,Stoll 的工作被认为是经典的^[1]。Stoll 进行的离心机实验中采用了两种 G-t 分布,见图 1。

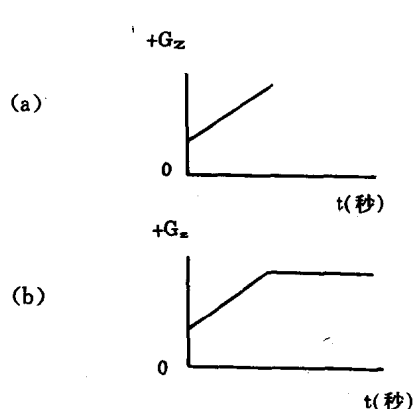


图 1 Stoll 实验采用的 G~t 分布

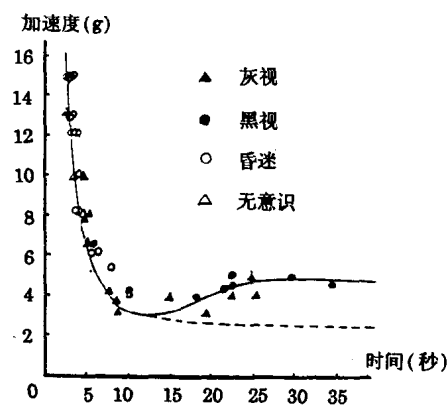


图 2 Stoll 整理的实验结果

图 1a 为斜坡—平坦分布,图 1b 为斜坡分布。在实验中,把人员在松弛状态下的生理耐受终点(灰视、黑视和意识丧失)标记在 G~t 曲线上,这些点的连线即构成一条双曲线,见图 2。Stoll 的研究结果在生理实验研究和数学模拟研究中得到广泛引用。最近,Thomas W. Moore 和 Leonid Hrebien 对 Stoll 的实验结论提出了质疑^[2],并建立了一个新的模型(以下简称 T-L 模型)。

T-L 模型的出发点是认为在离心机实验中应用的不同的 G~t 分布对人体的影响是不一样的,因而不应把不同的 G~t 分布下的实验结果标记在同一个图上。