

歼击机飞行员空中生理参数与飞行状态变化动态对应的可行性研究

姚永杰, 常耀明, 吴兴裕, 孙喜庆

第四军医大学航空航天医学系, 西安 710032

[摘要] 利用歼xx机载飞行参数记录系统和某型通用飞行训练质量评估专家系统, 对飞行参数、飞行过程、飞行阶段、飞行动作和姿态进行动态识别, 结合动态多参数生理检测仪的记录和分析, 精确获得飞行员每一飞行瞬态的心率、呼吸率、体温、过载和体动情况, 以及每一阶段的心率变异性时域和频域指标等生理指标。为空中动态精确分析飞行员的心理生理指标和脑力负荷的变化提供了一种方法和技术手段。

[关键词] 工作能力; 心理生理测量; 飞行员; 飞行参数; 工程心理学; 工效学

[中图分类号] R852

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)16-0018-04

Feasibility Study on the Correspondence Between In-flight Physiological Parameters of Fighter Pilot and Dynamic Flight Status Parameters

YAO Yongjie, CHANG Yaoming, WU Xingyu, SUN Xiqing

Department of Aerospace Medicine, Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China

Abstract: In the present study, three fighter pilots were monitored while performing routine flight training. ECG, respiration wave, body temperature, body movement and acceleration (G_z & G_x) were continuously measured and analyzed using a small recording device strapped around the chest. The flight parameters, critical events as well as the flight path of each flight were recorded using flight parameters recorder during the real flight and analyzed at the end of flight. The instantaneous heart rate and respiration rate at any flight instant can be determined through analyzing flight parameters recorded using flight parameters recorder. Time-domain analysis and frequency-domain analysis of short-time rapid HRV are carried out in different flight phases. This study provides a technique to analyze exactly in-flight psycho-physiological parameters and to measure mental workload dynamically.

Key Words: performance; psychophysiological measurement; pilot; flight parameters; engineering psychology; ergonomics

CLC Number: R852

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)16-0018-04

0 引言

随着新型战斗机座舱人-机界面设计的不断变化及飞机自动化程度的不断提高, 飞行员所面临的信息加工要求越来越严格, 使得脑力工作负荷越来越大, 并经常超过飞行员的认知能力, 进而引起信息获取分析的失误和决策错误, 这是导致事故征候和事故发生的重要原因^[1-2]。研究表明, 60%~90%的飞行事故和事故征候发生在脑力工作负荷强度大、应激水平高的起飞、进近和着陆阶段, 而且多是由人为差错引起的^[3]。随着新

机种陆续装备部队和训练强度的增大, 复杂特技飞行给飞行员的生理心理状态造成极大负担; 低空大速度飞行、空中加油飞行、复杂气象飞行伴随的应激水平增高和注意储备降低给飞行安全带来了严峻挑战; 发动机停车、座舱仪表显示失灵等不确定性因素, 对飞行员的情景认知及快速反应能力提出了更高的要求。完成飞行任务和确保飞行安全对脑力需求的提高必然导致脑力负荷的增加, 过高的脑力负荷将影响飞行人员的作业绩效, 进而影响飞行器系统功能的充分发挥, 威胁飞行安

收稿日期: 2007-07-11

作者简介: 姚永杰, 西安市长乐西路 17 号第四军医大学航空航天医学系, 副教授, 研究方向为航空航天医学;

E-mail: yaoyongjie@hotmail.com

全。在现代飞行条件下,航空军医的任务不能仅限于鉴定飞行员的健康状态,更要去判断飞行员完成飞行任务所必备的心理生理准备程度。在飞行准备阶段,借助于现代化仪器和认真观察,航空军医可以检查、分析、评定飞行员的功能状态;而在飞行条件下,飞行员远离航空军医,直接观察和评价飞行环境因素对飞行员耐力和工作能力的影响,变得十分困难。美国、俄罗斯和日本等西方国家研制的便携式生物信号检测设备可实时采集飞行员的心电、呼吸等生理数据,但在飞行过程中尚不能精确区分是哪个飞行阶段和何种飞行状态下的生理信号。本研究利用国产飞行员飞行状态生理检测仪,结合机载飞行参数记录设备,旨在探讨将空中记录到的飞行员生理参数变化与飞行动作、飞行状态和飞行阶段动态精确对应的可能性。

1 方法

1.1 飞行员飞行状态生理参数记录检测仪

KF2 型动态多参数生理检测仪(北京保迈科技有限公司研制)可长时间记录 3 个导联(V_1 , V_3 , V_5)的心电图(electrocardiograph, ECG)、1 路呼吸、两轴向体动以及体表温度等信号。检测仪由主机、副带、软件光盘和充电器构成。记录仪主机带体上 1 号电极位置参考胸导 V_5 位置,3 号电极位置参考胸导 V_3 位置,6 号电极位置参考胸导 V_1 位置;2 号为参考电极位置;8 号电极为负电极位置。

1.2 飞行参数记录和判读系统

采用我军现役主力作战机种歼 xx 机载飞行参数记录系统,进行飞行参数、飞行阶段、飞行航迹和姿态的判读。飞行参数为 xx 厂生产的 xx-20 型号。

1.3 研究对象及飞行科目实施

1.3.1 研究对象

1) 飞行员李 x, 男, 1984 年 5 月生, xx 航空兵训练基地 1 团 2 大队三级飞行员, 总飞行小时数 225 h, 歼 xx 机型飞行 10 h。

2) 飞行员秦 xx, 男, 1976 年 4 月生, xx 航空兵训练基地 1 团 2 大队一级飞行员, 总飞行小时数 758 h, 歼 xx 机型飞行 380 h。

1.3.2 飞行科目及组织实施

2006 年 10 月 27 日下午, 简单气象条件, 风速 15 m/s, 某机场能见度 8 km。飞行科目为连续 4 个起落航线带飞(303×4)。飞行员李 x 和飞行员秦 xx 同机起飞, 李 x 在前舱, 秦 xx 在后舱。起飞和着陆方向为 $90^\circ \rightarrow 270^\circ$ 。

1.4 飞行员空中生理参数和飞行参数的记录与对比分析

在塔台休息室, 于起飞前 20 min 给飞行员佩戴上飞行员飞行状态生理参数记录检测仪, 开始记录。飞行结束返回后, 通过专用数据分析软件离线分析, 对应架次的飞行状态、飞行阶段和飞行诸元素, 通过机载飞行

参数和判读系统进行分析。

飞行员飞行状态生理参数记录检测仪的时间记录形式为: x 年 x 月 x 日 x 时 x 分 x 秒。而机载飞行参数的时间记录形式为: 飞机发动机开车滑出开始计时, 为 0 s, 连续计时到飞行结束(发动机停车)。

对比分析时, 为使两种参数时间同步, 采用如下方法: 因为飞机起飞离地和起落架接地着陆的时间点可通过机载飞行参数和判读系统准确确定, 起飞离地时间点的确定依据为飞行高度表从“0”高度开始升高, 俯仰角开始增加; 起落架接地着陆的时间点的确定依据为飞行高度表到达“0”高度, 倾斜角为 0° , 俯仰角为 3.7° 左右。而在飞机起落架接地着陆的瞬间, 在飞行状态生理参数数据分析结果的信号波形图上, 一定出现瞬态振荡性过载, 然后从该时间点减去飞机空中飞行时间(由机载飞参系统提供), 就可确定飞行状态生理参数数据分析结果的信号波形图上对应的起飞时间点。这样两系统在从起飞到着陆的每一时间点都可以精确对应起来。飞行员在不同飞行状态、不同飞行阶段、各种飞行机动动作下的生理功能状态动态变化过程可以由此确定。

2 结果

整个飞行过程中的两个飞行员的心率、呼吸率、体动强度、体温和过载值的动态变化曲线见图 1(飞行员李 x)和图 2(飞行员秦 xx)。在起飞前休息的过程中, 两飞行员的心率均在 75 次/min 上下波动, 李 x 的呼吸率在 20 次/min 左右, 秦 xx 的呼吸率在 17 次/min 左右。从塔台休息室走向停机坪的过程中, 两人的心率和呼吸明显增加; 进入座舱时心率均超过 100 次/min, 呼吸也有所增加; 在等待起飞和飞行前检查的时候, 心率和呼吸有所下降。整个飞行过程中, 在起飞、3 次着陆起飞和着陆的过程中, 可见心率显著升高, 飞行员秦 xx 的心率高于李 x。飞行过程中, 两飞行员的体表温度缓慢升高。

该架次飞行全过程的航姿叠加示意图见图 3。飞行过程为 4 个连续的起落, 图中所选取飞机瞬态点分别是: “0”点, 飞机从停机坪上开车滑出, 此时的飞行参数为航向角 236.9° , 俯仰角 -0.9° , 倾斜角 1.4° , 高度 0 m, 速度 21 km/h; “1”点, 飞机在第 1 个起落航线的第 2 转弯过程中, 此时的飞行参数为航向角 114.2° , 俯仰角 -0.5° , 倾斜角 -10.2° , 高度 517.5 m, 速度 486 km/h; “2”点, 飞机在第 2 个起落航线的第 4 边飞行过程中, 此时的飞行参数为航向角 336.9° , 俯仰角 7.9° , 倾斜角 0° , 高度 444 m, 速度 382 km/h; “3”点, 飞机在第 3 个起落航线的第 1 转弯过程中, 此时的飞行参数为航向角 217.5° , 俯仰角 5.1° , 倾斜角 -46.5° , 高度 524 m, 速度 466 km/h; “4”点, 飞机在第 4 个起落航线的第 4 边飞行过程中, 此时的飞行参数为航向角 334.1° , 俯仰角 6.5° , 倾斜角 -1.5° , 高度 440 m, 速度 392 km/h。在这些飞行



图 1 飞行员李×(前舱)303×4 飞行过程中的心率、呼吸率、过载值、体动强度和体温的动态变化趋势图

Fig. 1 Dynamic trend graph of heart rate, respiration rate, acceleration (G_z and G_x), body movement and body temperature of a pilot seated in front seat during one scheduled flight



图 2 飞行员秦××(后舱)303×4 飞行过程中的心率、呼吸率、过载值、体动强度和体温的动态变化趋势图

Fig. 2 Dynamic trend graph of heart rate, respiration rate, acceleration (G_z and G_x), body movement and body temperature of a pilot seated in rear seat during one scheduled flight

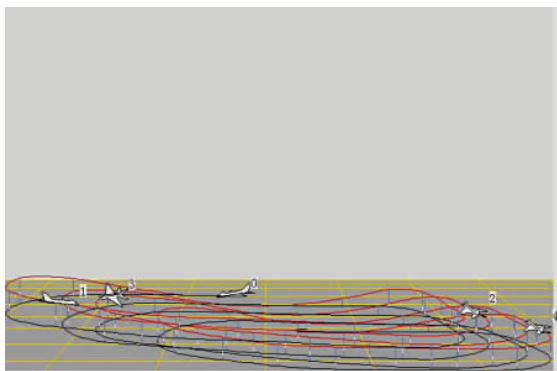


图 3 飞行员李×和飞行员秦××起落航线带飞时飞行轨迹和立体航姿叠加示意图

Fig. 3 Three-dimensional flight path and aircraft attitude in scheduled traffic pattern flights

表 1 303×4 起落航线带飞时不同时间点
飞行员心率和呼吸的变化

Table 1 Heart rates (HR) and respiration rates (RR) of the two pilots during real traffic pattern flights

飞机瞬态	前舱飞行员李×		后舱飞行员秦××	
	HR /(次·min ⁻¹)	RR /(次·min ⁻¹)	HR /(次·min ⁻¹)	RR /(次·min ⁻¹)
0(5 s)	72	20	82	23
1(227 s)	69	19	83	15
2(562 s)	64	23	102	19
3(632 s)	64	22	79	17
4(982 s)	86	21	93	21

瞬态点对应的两个飞行员的生理参数见表 1。

对两飞行员第 1 次进近着陆到第 2 次起飞阶段和第 2 次起落航线过程中第三边平飞阶段的心率变异性 (Heart Rate Variability, HRV) 分析发现, 两飞行员着陆起飞的时域指标——NN 间期标准差 (SDNN)、相邻 NN 间期差值的均方根 (RMSSD)、NN 间期直方图的宽度 (TINN) 和频域指标——HRV 总功率 (TP)、HRV 高频谱成分归一化参数 (HF norm), 均小于第三边平飞的 HRV 时域和频域指标。不论是在起飞着陆阶段还是第三边平飞阶段, 飞行员秦××的 HRV 时域指标 SDNN、RMSSD、TINN 和频域指标 TP、HF norm 均小于飞行员李×的时域和频域指标, HRV 低频谱成分归一化参数 (LF norm) 和 HRV 低、高频谱成分功率比 (LF/HF), 均高于李×的对应指标。在分析着陆起飞阶段和第三边平飞阶段的差异时, HRV 分析时段均为 1.5 min。两飞行员着陆起飞阶段和第三边平飞阶段的 HRV 分析结果见表 2。

3 讨论和结论

测量飞行员空中的心理生理参数, 评定其不同飞行条件下的脑力负荷变化规律, 是当前航空心理生理学领域的重大理论和现实问题^[4-5]。因为飞行员的心理生理指标的变化受多项因素的影响, 在不同飞行阶段和不同的飞行科目, 飞行员面临的应激环境差异明显。将记录到的飞行员心理生理变量和飞行参数系统进行一一对应, 才能准确获得其不同的飞行阶段、不同飞行时刻的心理生理变量的动态变化, 分析比较飞行员的神经-心理紧张度和脑力负荷状态变化。

飞行参数是用来客观评价飞行作业绩效的机载记录设备, 它还可提供不同飞行阶段的时间、机动飞行的次数, 与规定速度、高度、加速度的偏差值的大小, 甚至可提供错误驾驶动作, 如包线外速度和加速度的情况, 还可提供对座舱仪表信息的回放。新型战斗机机载飞行参数记录仪不仅可记录飞行时 6 自由度参数的动态变

表 2 两飞行员着陆起飞阶段和第三边平飞阶段的 HRV 指标的比较

Table 2 Time-domain and frequency-domain analysis of heart rate variability for the two pilots during landing-take off phase and cruising on the downwind leg phase

心率变异性分析	着陆-起飞		第三边平飞	
	前舱飞行员	后舱飞行员	前舱飞行员	后舱飞行员
时域指标				
SDNN/ms	40.3	37.4	45.6	45.0
RMSSD/ms	11.8	3.6	14.8	5.9
TINN/ms	137	89	177	156
频域指标				
TP/ms ²	1 141	285.6	1 395	1 358
LF/ms ²	438.6	76.8	395.2	582.3
HF/ms ²	368.8	33.2	651.2	237.4
LF norm/nu	54.3	69.8	37.8	71.0
HF norm/nu	45.7	30.2	62.2	29.0
LF/HF	1.2	2.3	0.6	2.5

化,还可给地面指挥员实时提供航迹、航姿和座舱仪表等信息^[6]。

尺寸小的监控设备或安装于飞行服或防护装备里的生理监控系统,有其独特的优越性,代表航空心理生理监测的发展趋势。我国研制的飞行员飞行状态生理检测记录仪,可全程记录和分析飞行过程中的 ECG、呼吸等生理信号,体积小、应用方便、信噪比较高;缺点是尚不能进行远程实时信号传输,也不能精确定位是在何种飞行阶段、何种飞行动作下的生理变量。本研究将机载飞行参数记录与空中生理检测信号相结合,通过飞行参数判断不同的飞行阶段、飞行动作和飞机姿态,精确对应飞行中记录的生理指标。

通过分析飞行员李×和秦××同架次起落航线时 HRV 的指标可以发现,飞行员秦××的 HRV 小于李×,表现为在飞行过程中的 HRV 的时域指标 SDNN、RMSSD 和 TINN 较小,频域指标 TP 和 HF norm 也小于李×,但是 LF norm 和 LF/HF 却高于李×。虽然秦××为一级飞行员,飞行小时数长,李×为三级飞行员,飞行小时数较少,但秦××的脑力负荷程度和应激水平要高于李×。可能的原因是:秦××为飞机飞行教员,除观察指导前舱飞行员的飞行动作外,还要随时做好准备,以应付意外情况突发时,接过驾驶杆操纵飞机。责任的重大使得秦××表现出较高的交感神经兴奋水平和高的脑力负荷。但这只是一个特例,要获得不同等级飞行员之间脑力负荷程度和应激水平的差异,需要在不同的飞行科目、不同的飞行阶段做一定样本的科学实验。同时,在本研究中,也发现飞行员在连续着陆起飞阶段的脑力负荷程度可能高于在三边平飞阶段的脑力负荷程度,主要表现为着陆

起飞阶段的 HRV 的时域指标 SDNN、RMSSD 和 TINN 和频域指标 TP 和 HF norm 小于三边平飞阶段的 HRV 指标。当然,仅凭 HRV 单项指标是不足以全面分析应激水平和脑力负荷程度的,还要结合其他心理生理指标和所处的飞行状态和任务,从“飞行员-飞机-环境-任务”角度综合评定飞行员的心理生理和操纵作业状态。

本研究表明,通过机载飞行参数记录系统和某型通用飞行训练质量评估专家系统,可对飞行过程、飞行阶段、飞行动作和姿态进行动态识别,结合 KF2 型动态、多参数生理检测仪的记录和分析,可精确获得每一飞行瞬态的心率、呼吸率、体温、体动情况和每一阶段 HRV 的时域和频域等心理生理学指标,为空中动态精确分析飞行员的心理生理指标和脑力负荷的变化提供了一种行之有效的方法。

参考文献 (References)

- [1] O'HARE D. Cognitive functions and performance shaping factors in aviation accidents and incidents [J]. The International Journal of Aviation Psychology, 2006, 16(2): 145-156.
- [2] ЗОРИЛЭ В И, УШАКОВ И Б. Функционально-адаптивная система управления летательным аппаратом - новый уровень обеспечения безопасности полетов. В кн: Человеческий фактор новые подходы в профилактике авиационной аварийности [M]. Под ред. Козлова ВВ М: Полиграф, 2000: 36-58.
ZALILE V E, WUSHAGOF E B. Function-adaptive system to operate an aircraft, new level of safeguarding flight safe. In: GAZLOF VV, eds. New results of human factors in practical air accident [M]. Moscow: Poligraf, 2000: 36-58.
- [3] WICHENS C D, HOLLANDS J G. Assessing mental workload[M]// Engineering psychology and human performance, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2000: 459-471.
- [4] DAHLSTROM N, NAHLINDER S. A comparison of two recorders for obtaining in-flight heart rate data [J]. Applied Psychophysiology and Biofeedback, 2006, 31(3): 273-279.
- [5] ROSCOE A H. Assessing pilot workload. Why measure heart rate, HRV and respiration [J]. Biological Psychology, 1992, 34(2-3): 259-287.
- [6] БОЧЕКОВ А А, БОНДАРЕВ Э В. Средства объективного контроля в практике авиационного врача [M]. Ленинград, 1984: 43.
BANQIGOF A A, BANDALIEF AV. Method of objective inspection in practice of flight surgeon[M]. Leningrad, 1984: 43.
- [7] РУДНЫЙ Н М. Авиационная медицина [M]. М: Медицина, 1986: 580.
LUDNEI N M. Aviation medicine [M]. Moscow: Medicine, 1986: 580.

(责任编辑 李慧政)