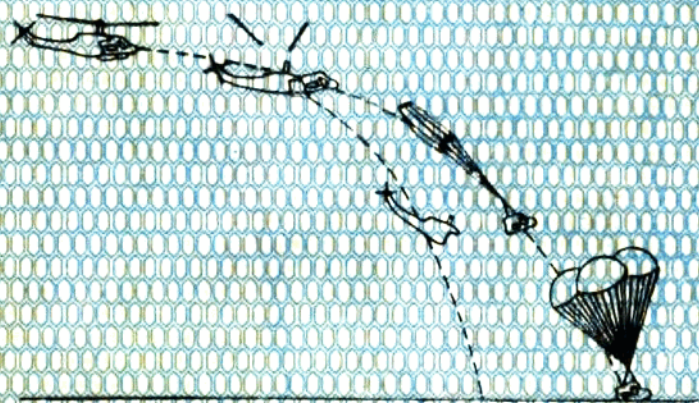


飞行器安全救生

张汉箴 主编

750744



北京航空航天大学出版社

750744

V244/06

飞行器安全救生

张汉镔 主编

HK3118



北京航空航天大学出版社



C0232521

内 容 简 介

本书根据航空航天工业部院校有关教学大纲编写,书中主要阐述飞行器个人防护救生和安全问题。全书共十四章。前八章介绍了飞机应急救生条件和所需解决的问题;飞机救生系统及其部件(弹射装置、降落伞等)的工作原理、构造、设计原则和计算方法、试验方法以及其发展方向,对载人航天飞行器的各种救生方案作了系统介绍。后六章介绍了飞行中遇到高空低压、缺氧、热负荷、高过载和碰撞等环境因素对人体的影响,并系统介绍飞行员各种防护装备的防护机理、设计原则和计算方法,对各种航天服作了专门论述。

本书可作为航空航天工业部所属高等院校的教材,可用作有关专业培训工程技术人员的教材,也是航空航天有关专业工程技术人员的重要参考书。

飞 行 器 安 全 救 生

FEIXINGQI ANQUAN JIUSHENG

张 汉 滨 主 编

责任编辑 曾昭奇

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

北京密云华都印刷厂印装

787×1092 1/16 印张: 17.5 字数: 443千字

1990年元月第一版 1990年元月第一次印刷 印数: 800册

ISBN 7-81012-142-1/V·014 定价: 3.50元

前 言

现代飞行器是安全可靠的，但是还不能保证飞行中不发生故障。在战斗过程中，飞行器被击中而不能正常飞行，甚至机体损毁则更是经常发生的。因此，必须保证飞行员在飞行中发生故障而弃机时能立即安全离机、下降、着陆（或水面）、生存待援以及最后安全返回基地。当飞行处在平飞状态，飞行速度不超过500km/h时，飞行员可以打开舱盖，解开安全带，从座舱中爬出，然后乘降落伞下降。但是现代高性能飞机发生故障时所处的飞行状态和飞行速度都可能在很大范围内变动。如果采用上述简单方法必然会导致飞行员和飞机的某些部件例如机翼、尾翼等相碰撞而导致伤残以至死亡，或者根本无法出舱，或者出舱后瞬间即被高速气流吹袭而致伤或致死。50年代发展了弹射救生技术，即利用动力将飞行员连同座椅一起从飞机弹出到安全距离以外，然后再开伞下降直至平安到达地面（或水面）。目前这是高性能飞机在应急情况下飞行员的唯一可靠救生设备。从1956年美国公布的统计资料来看，在飞行速度小于470km/h弹射时，约有90%的飞行员能够救生。而速度大于900km/h时，救生的成功率约50%，其余是重伤和死亡。最近二、三十年来弹射救生技术采用了很多新技术，因此安全率也有所提高。但是新研制飞机的性能有很大提高而弹射救生技术尚不能完全满足这些增长的要求，各国都在研制新的性能更高的弹射救生系统。另外，过去较大的注意力集中在单座战斗机飞行员的救生方向，而对多座飞机人员的弹射救生、直升机的救生、航天飞机的救生等很多领域研究得不够，因此尚有很多问题急需解决。

现代飞机一般都配有良好环境控制系统的气密座舱，因此乘员是处在接近正常地面条件的良好环境之中。但是当座舱失去气密时，舱内人员立即暴露在恶劣的外界环境中。如果没有完善的防护装备则将无法忍受。有些战斗机由于战斗条件的要求和节省环控系统的重量、容积和价格，即使在正常飞行中也不提供足够的座舱空气压力。因此这种飞机的飞行员在正常飞行中也要佩戴供氧面具以提高吸入气中的氧分压。所以必须为高性能飞机乘员提供防护高空低压、缺氧、热应激、碰撞、过载等性能的个人防护装备。随着飞机性能的提高，它在机动飞行中对飞行员产生的正向过载值、过载增长率和持续时间都大幅度提高，因此使原有的抗荷系统无法满足要求。近年来各国研制高性能抗荷系统已成为十分迫切的问题了。

本书叙述了飞行中遇到的一些环境因素以及其对人体的影响、防护这些因素的原理、防护救生装备的工作原理、设计理论基础和设计方法、研究和发展防护救生装备的方向和途径。本书总结了我国和国外在研究、制造和发展飞行员防护救生装备方面的经验，为防护救生设备设计者和在航空航天领域中工作的工程技术人员提供有关资料。

本书由北京航空航天大学张汉镛同志主编，参加编写工作的有南京航空学院龚文轩、吴剑萍、王利荣、北京航空航天大学孙长祝、张汉镛等同志。全书共十四章。第一、五章由龚文轩编写，第二、四、六、七、八章由孙长祝编写，第三章由吴剑萍编写，第九、

十三、十四章由王利荣编写，第十、十一、十二章及附录由张汉铨编写。全书由王德康志审定，并提出了宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平，书中有不恰当甚至错误的地方，敬请批评指正。

主编 张汉铨

1988年11月

符 号 表

A	面积
A_s	稳定板面积
A_e	喷管出口面积
A_f	总燃烧面积
A_c	燃烧面积 (单根药柱)
A_c	临界截面积
A_{us}	稳定伞面积
A_s	座椅气动特征面积
α	燃烧指数
C	阻力系数
C^*	特征速度
C_c	流量系数
C_T	推力系数
C_m	气动力矩系数
$C_{m\theta}$	座椅的俯仰阻尼力矩系数
C_v	定容比热
C_{us}	稳定伞阻力系数
C_d	气动阻力系数
C_L	气动升力系数
C_L'	升力系数 C_L 曲线的斜率
D	直径, 外径, 药柱外径
d	内径, 药柱内径
DRI	动力响应指数
E	弹性模数, 能量
E_s	散热能量损失
F	力, 火箭推力, 面积
F_f	摩擦力
F_i	火箭内表面作用力
F_p	推气孔流通面积
F_T	特征推力
F_s	弹射力
F_o	火箭外表面作用力
F_s	火箭助推器的侧向推力

\bar{F}	平均推力
f	火药力
f	挠度
G	重力, 重量, 人-椅系统重量
G_p	排气流量
G_r	已燃火药重量
$G_{...}$	单位时间火药燃烧量
G_v	火药重量
g	重力加速度
H	焓
H_0	入口截面焓
H_1	出口截面焓
H_0	滞止焓
h	长度, 药柱长度
I	惯性矩, 转动惯量
I_A	绕A轴惯性矩
I_C	绕重心惯性矩
I_f	火箭总冲
I_s	火箭比冲量
I_x	绕x轴惯性矩
j	加速度
K	弯曲刚度
k	绝热指数, 比热比
k_1	摩擦修正系数
k_2	散热修正系数
L	长度, 总行程, 座椅的特征长度
L_0	弹射机构的行程长度
L_p	距离, 座椅重心到稳定伞连接点的距离
l	行程
M	质量流量, 力矩
M_G	重力矩
M_j	弹射力矩
M_P	升力力矩
M_R	阻力力矩
$M_{\dot{\gamma}}$	火箭喷流阻尼力矩
$M_{\dot{\theta}}$	俯仰阻尼力矩
M_{st}	稳定伞力矩
m	质量, 人-椅系统质量
m_f	附加质量
2	

m_p	装药质量
\dot{m}	质量流量
\bar{m}	平均分子量
N	数量, 药柱根数
n	过载
n_x	弹射过载
n_{max}	最大过载
P	升力, 人-椅系统的升力
p	压力
p_0	大气标准压力
p_e	入口压力
p_s	出口压力
p_{max}	最大压力
p_0	初始压力
Q	阻力, 人-椅系统阻力, 热功当量
Q_{10}	热值
R	燃气气体常数, 反作用力
R_0	通用气体常数
r	座椅重心向量半径
s	距离
T	绝对温度
T_e	出口温度
T_f	出口总温
T_x	系统动能
t	时间
t_0	火箭工作时间
t_k	开伞时间
t_m	工作时间, 充满时间
t_L	拉直时间
u	速度, 燃烧速度
u_1	燃烧速度系数
u_e	燃气出口速度
u_{ef}	等效喷气速度
u_L	极限喷气速度
v	速度, 弹射座椅的运动速度
v_f	飞机的飞行速度
v_i	表速
v_{t_0}	弹射初速
v_e	弹射出口速度

v_{z0}	飞机下沉速度
W	容积
W_B	燃烧定容积
W_c	弹射机构平均容积
W_f	弹射弹自由容积
W_0	初始容积
w	比容
w_1	火药气体比容
x_T	座椅重心坐标
y_T	座椅重心坐标
α	余容, 冲角
β	夹角
β_1	火箭推力与靠背夹角
γ	夹角, 重度
γ_f	飞机俯冲角
γ_r	飞机滚转角
Δ	装填密度
δ	弹性压缩变形
δ_w	单位功
ζ	阻尼比
θ	速度角
θ_0	初始速度角
θ	座椅倾角
μ	流量系数
ρ	密度, 空气密度, 燃气密度
φ	夹角
φ_0	人-椅系统的轨迹偏转角
$\dot{\varphi}$	角速度
χ	导轨后倾角
ω	角速度
ω_c	绕C点转动角速度
ω_n	无阻尼自然频率
ω_0	初始角速度
ω_z	座椅的转动角速度

目 录

前 言
符 号 表

第一章 飞机弹射救生基本问题

第一节	飞机应急离机过程和弹射救生基本问题	(1)
第二节	弹射救生过程中的过载	(3)
第三节	高速气流吹袭	(13)
第四节	座椅离机后的稳定性	(14)
第五节	救生过程中的干扰	(15)
第六节	低空救生	(17)

第二章 弹射救生装置

第一节	消除弹射通道装置	(21)
第二节	弹射座椅	(27)
第三节	弹射动力装置	(37)
第四节	救生伞系统	(40)

第三章 救生伞理论

第一节	救生伞的工作过程	(45)
第二节	降落伞的气动性能	(49)
第三节	降落伞开伞过程计算	(60)
第四节	伞衣结构设计	(75)
第五节	伞衣强度计算	(78)

第四章 弹射动力装置性能计算

第一节	概述	(86)
第二节	火药的基本知识	(87)
第三节	弹射机构内弹道计算	(90)
第四节	火箭弹射动力装置	(98)

第五章 弹射座椅离机后的运动计算

第一节	概述	(104)
第二节	作用在弹射座椅上的力和力矩	(108)

第三节	座椅运动方程及其解法	(112)
第四节	飞机垂直机动飞行状态下弹射	(114)
第五节	各种参数对弹射座椅运动轨迹的影响	(120)
第六章 弹射座椅运动稳定性		
第一节	概述	(126)
第二节	座椅脱离导轨瞬间的倾角和角速度计算	(126)
第三节	座椅与弹射机构分离瞬间的倾角和角速度计算	(131)
第四节	考虑弹射机构弹力的座椅离机的倾角和角速度计算	(134)
第五节	弹射座椅运动稳定性分析	(136)
第七章 各种飞行器的应急救生装置		
第一节	弹射座舱和分离座舱	(141)
第二节	直升机救生设备	(143)
第三节	旅客机应急救生设备	(150)
第四节	航天飞行器的救生方案和设备	(154)
第八章 救生设备的试验		
第一节	概述	(165)
第二节	风洞试验	(166)
第三节	地面发射试验	(166)
第四节	火箭滑车试验	(168)
第五节	空中试验	(170)
第九章 飞机供氧系统		
第一节	概述	(173)
第二节	供氧系统及其主要参数	(176)
第三节	氧源	(181)
第四节	氧气调节器	(187)
第五节	氧气调节器的主要机构	(194)
第十章 飞行防护服装		
第一节	概述	(202)
第二节	全压服	(203)
第三节	分压服(代偿服)	(216)
第十一章 航天服		
第一节	舱外服	(221)
第二节	登月服	(232)

第十二章 抗荷系统	
第一节 飞行中的长时间加速度	(241)
第二节 长时间正加速度对本体的影响	(244)
第三节 对长时间正加速度的防护	(245)
第四节 抗荷服系统	(246)
第五节 抗荷调压器	(247)
第十三章 保护头盔	
第一节 飞行中的碰撞及头部损伤	(250)
第二节 头盔防护机理	(251)
第三节 保护头盔的设计要求和典型保护头盔	(252)
第十四章 海上及沙漠救生	
第一节 海上及沙漠不竟对本体的影响	(256)
第二节 海上救生	(257)
第三节 沙漠救生	(261)
附录	(263)
参考文献	(265)

第一章 飞机弹射救生基本问题

第一节 飞机应急离机过程和弹射救生基本问题

现代飞机失事时，保证飞行员救生的工具是弹射座椅和救生伞。弹射座椅保证飞行员顺利地脱离飞机；救生伞保证飞行员安全地着陆。

飞机弹射救生的一般过程如图1-1所示。可分为六个主要阶段：

- 1) 弹射准备：飞行员决定弹离飞机，按要求做好弹射准备姿势；
- 2) 抛座舱盖：飞行员操纵抛盖系统，抛掉座舱盖；
- 3) 弹射离机：飞行员击发弹射弹，弹射机构把人-椅系统弹离座舱，并越过垂直尾翼；
- 4) 稳定减速：人-椅系统在空中继续作稳定减速运动；
- 5) 人、椅分离，打开主伞，飞行员乘主伞缓慢下降；
- 6) 安全着陆。

这六个阶段是连续发生的。有的阶段时间极短，例如抛盖和弹射；有的阶段则较长，例如飞行员乘主伞降落。对于不同的弹射座椅系统，救生程序可有所不同。但是救生过程的每一阶段都必须安全可靠。某一阶段发生故障或失败，就会严重影响飞行员的生命安全。因此有必要研究救生过程的每一个阶段及其相互间的衔接，找出并解决其中的关键问题，以保证可靠救生。

纵观弹射救生过程，保证飞行员安全救生，必须满足两个基本条件。即：保证飞行员顺利地脱离飞机和保证救生伞及个人防护装备可靠的工作。

一、保证飞行员顺利离机

应急脱离飞机的条件取决于飞行速度、飞行高度、飞机的布局、脱离系统的性能、地理气象条件、飞行员的生理和心理状态以及飞机失事的应急情况等各种因素。但就高速飞机的救生来看，飞行员离机的安全性基本上决定于下列几个问题解决的程度。

- 1) 保证飞行员迅速离机，及时与弹射座椅分离，并使其不产生空中碰撞；
- 2) 迎面气流引起的制动过载，应保证在人体许可制动过载的范围内；
- 3) 克服由于迎面气流影响所造成的旋转运动及飞行员头颈和四肢的摆动；
- 4) 保证飞行员人体部分免受高速气流的直接侵袭。

从上述条件中可以清楚地看出，飞行速度的增加，将大大恶化被迫离机条件。因为当在一定飞行高度和忽略飞行速度对阻力系数的影响时，气动阻力是与速度的平方成比例的。随着飞行速度的大大增加，人所受的动压力也就急剧增加。

如图1-2所示，当飞行速度不超过180km/h时(表速)，飞行员可以不很费力的经过座舱盖、机门或舱口离开飞机。在这种情况下，飞行员所受的空气阻力约为800~1000N。然而，当速度为360km/h，即速度增加一倍的情况下，空气阻力增加为原来的四倍。此

时作用于人体的阻力达3200~4000N。当速度增加至每小时500km时，甚至伸在机舱外的头及手就承受500~800N的阻力。可以设想，在这种情况下，飞行员想凭借自身的体力来跳出机舱，几乎是完全不可能了。同时，即使当飞行员“艰难”地爬出了座舱，由于脱离飞机的速度如此的小（几乎为零），迎面的高速气流很快将飞行员吹向尾翼，此时生存的可能性也是不大的。

二、保证救生伞可靠的工作

救生伞的可靠工作取决于下述的几个条件：

- 1) 救生伞能在任何飞行条件下的许可速度范围内开伞；
- 2) 飞行员自应急离机高度到允许救生伞开伞高度的稳定坠落；
- 3) 足够的开伞高度，以保证救生伞开伞和减速到人体允许的着落速度（6m/s）。

对于飞行速度不大于300km/h的飞机来说，由于普通结构的救生伞也能保证飞行员离机后安全开伞，所以基本上不存在第一个开伞条件问题。目前性能最优良的救生伞可允许在机速为600km/h的情况下强制开伞（离机后立即打开伞包），可深证开伞动载不致引起超过伞结构的许可强度及人的允许承受过载极限。当速度超过此值时，采用单个救生伞就无法保证上述开伞条件，除非飞行员能继续操纵失事的飞机，使其减速到允许开伞的速度以下，然后离机，或者在离机后经一段时间的减速后，在允许的开伞速度下进行开伞。

上述的两种可能情况在飞行速度很大的飞机上是很难实现的。因此在近音速或超音速飞机上普遍采用两个或三个减速伞以达到第一个许可开伞条件。当然在开主伞前的这一段减速过程中要保证足够的稳定。一般可依靠小减速伞作稳定伞，使减速和稳定同时得到满足。最后问题就在于需要足够的高度，以便在经过稳定减速阶段损失了大量高度之后，还能具有足够的主伞开伞高度，保证飞行员的安全着陆速度。

综上所述，我们可以把飞机的弹射救生条件归结为以下五点：

- 1) 弹射救生系统在工作过程中产生的过载，应保证在人体的许可过载范围内；
- 2) 有效地防护飞行员的脸部及其他部分（主要是四肢）免受高速气流的吹袭影响；
- 3) 人椅离机后，保证飞行员处于稳定状态；
- 4) 必须顺利地脱离失事的飞机，防止飞行员与飞机的各部分的一切干扰现象；
- 5) 保证最低的安全救生高度。

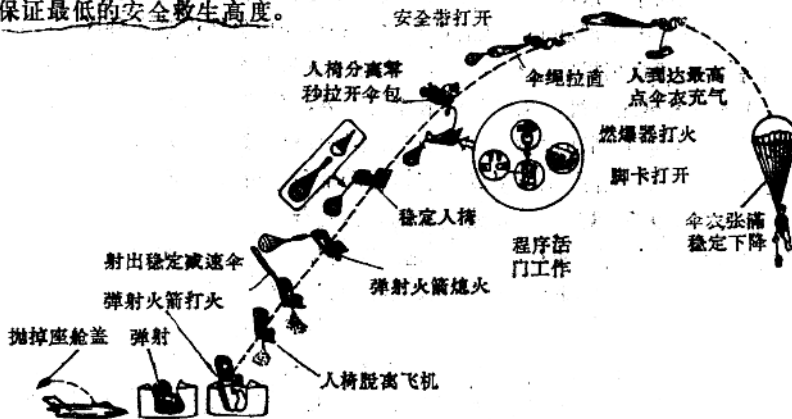


图1-1 飞机弹射救生一般过程

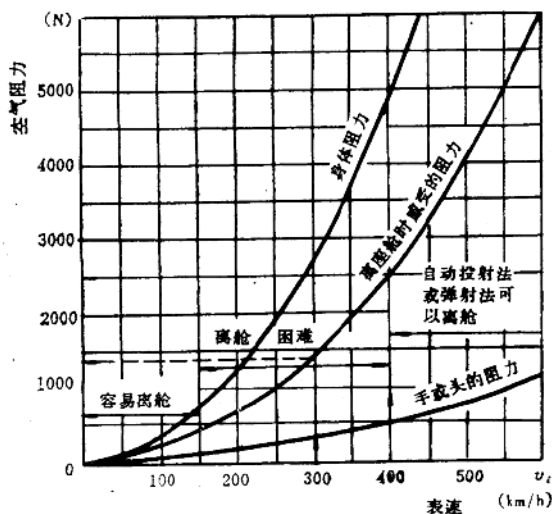


图1-2 根据飞行速度身体阻力的变化

第二节 弹射救生过程中的过载

一、过载的概念

过载是由物体受到外力作用，作加速或减速运动时实际作用在物体上的一种载荷。对于过载，目前有两种不同的定义：

第一种过载定义为：过载 n 是作用在运动物体上的外力（此外力不包括重力）和运动物体重量之间的比值。

第二种过载定义为：过载 n 是物体运动加速度与重力加速度之比值，或者说，过载 n 是包括重力在内的外力与物体重量之比值。

现在以弹射方程为例来说明过载的性质。人-椅系统在出舱过程中作用有弹射推力 F_t 和重力 G 。人-椅系统在这两种力的作用下作加速运动。可列出如下方程：

$$m \frac{dv}{dt} = F_t - G \cos \chi \quad (1-1)$$

式中 m —— 人-椅系统质量；

$\frac{dv}{dt}$ —— 人-椅系统重心加速度；

F_t —— 弹射推力；

G —— 人-椅系统重量；

χ —— 弹射座椅的安装角。

根据第一种过载定义，过载 n 为

$$n = \frac{F_t}{G} = \frac{dv}{dt} + \cos \chi$$

设 $\chi = 0$, 则

$$n = \frac{dv}{dt} + 1 \quad (\text{垂直地面方向})$$

$\chi = 90^\circ$ 则

$$n = \frac{dv}{dt} \quad (\text{水平方向})$$

由此可知: 物体作垂直加速运动时, 过载等于加速度值与重力加速度值的比值, 再加一个单位过载; 物体作水平加速运动时, 过载等于加速度值与重力加速度值的比值。对于静止着的物体来说, 其加速度等于零。因此, 按第一种过载定义, 在垂直方向上过载为1; 而按第二种过载定义, 则在垂直方向上过载为零。在水平方向上, 按上述两种过载定义, 过载均为零。也就是说, 在平行于地面的水平方向上, 两种定义的过载值是一样的。在垂直地面方向上, 两种定义的过载值相差一个单位的过载值。

由过载定义可知, 过载是一个无量纲的值。它反映了物体加速度的相对大小, 也反映了物体所受外力的相对大小; 同时它也是有方向的。我们定义过载的方向为物体惯性力的方向。所以, 过载的方向与加速度的方向相反, 亦即在加速时, 它与运动方向相反, 而在减速时, 它与运动方向相同。

在高速飞机上救生时, 为了避免飞行员在弹离飞机本体后碰撞飞机的凸出部分(如垂直尾翼), 要求它具有一定的弹射出口速度, 使人有足够的轨迹高度越过垂直尾翼。由于

弹射出口速度是在短行程内获得的, 所以在弹射过程中会有很大的过载作用在人体上, 其作用时间一般为0.2~0.3s。当人离开飞机后, 由于气流的制动作用, 又会使人承受制动过载。当救生伞开伞时, 由于气动载荷突然加大, 使人-伞系统的下降速度立即减慢, 此时人又受到开伞过载。在人着陆时, 下降速度立即变为零, 此时又受到着陆过载的作用。

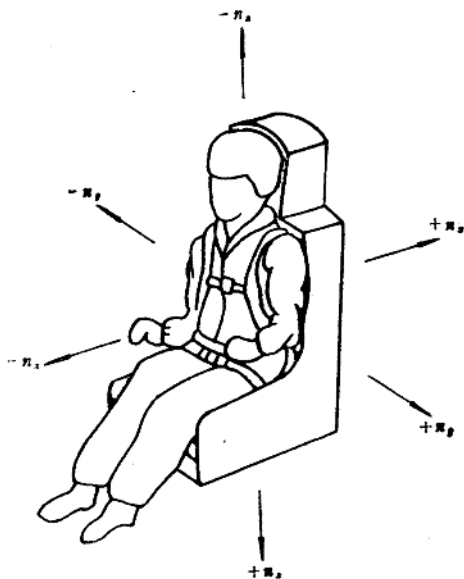


图1-3 作用于人体的生理加速度坐标系

对人来说, 当过载的方向是沿着躯干时, 称为纵向过载。当过载的方向是从前向后或者相反时, 称为横向过载。当过载方向是从右方向左方或由左方向右方作用时, 称为侧向过载。此外, 纵向过载常分成正向和负向两种, 从头向脚作用的过载属于正过载, 从脚部向头作用的过载属于负过载。飞行员从飞机中向上弹射时及乘

降落伞下降时开伞所感受到的过载都是正过载。人承受负过载的能力要较承受正向过载的差, 故一般应尽量避免使人承受负过载。

若物体承受到若干种力的作用, 则在计算过载时必须求出这些力的几何总和, 这时并

不考虑重力。按照所采用的定义，作用在静止物体上的过载等于1。若考虑重力，则物体静止时的过载就等于零（因为重力和支座的反作用相互抵消）。

计算过载时，作用在物体上的力的几何总和，同样也不包括惯性力。

物体所承受的加速度的类型（向心的、直线的加速度）是不影响过载大小的，只是过载的方向与加速度的类型有关。为便于分析和计算过载，象速度和加速度一样，把过载标定在直角坐标系的三轴上（见图1-3）。z轴是沿脊椎向下， $+n_z$ 表示加速度作用使心脏向下移位。x轴是前胸到后背， $+n_x$ 表示加速度作用使心脏向背部移位。y轴是由右到左， $+n_y$ 表示加速度作用使心脏向左移位。

在航空医学上，当谈到过载对机体的影响时，往往用“生理加速度”这个术语，而不用过载这一术语。

二、过载对人体的影响和耐受极限

人体是由骨骼、肌肉和内脏器官等组成的。骨骼系统是刚性结构，具有一定的强度，不易变形，起着支持全身重量的作用，是人体承受过载的主要构件。肌肉附着在骨骼上，它们在过载作用时起维持姿势的作用，也是受力构件。心、肺、脾、肝、肾等脏器则以韧带及结缔组织悬垂在骨架中，它们在过载作用下会发生移位、变形。此外，人的循环系统中的血液也会受过载作用而影响其流动。

根据过载对人体的作用时间，可以把过载分为瞬时过载和长时间过载两类。我们把作用时间不超过0.5s的过载称为瞬时过载，超过0.5s的过载称为长时间过载。瞬时过载即一种冲击载荷，它对人的影响主要表现在骨骼机械损伤上。例如纵向正向瞬时过载（ $+n_z$ ），主要是由人体脊柱承受的。这时人体的耐受极限主要由人体脊椎骨机械强度决定。当作用时间超过0.5s时，则人体不但受到机械性影响，而且更主要的是血液循环系统和神经系统都会受到影响。例如纵向正过载时，由于大血管走向平行于人体纵轴，血液受惯性力影响向人体下部流动，而发生脑贫血，头部血压降低，发生视觉障碍——“黑视”，最后可出现昏迷。在纵向负过载时则相反，会发生脑充血，头部血压升高，视觉发红——“红视”，严重时也可引起昏迷。除血液循环系统外，长时间纵向过载对心、肺和高级神经活动都会产生影响。横向过载（ $+n_x$ ）对呼吸肺循环有较大影响。弹射过程中气动力产生的制动过载过大时，还会引起勒伤、扭伤。由此可见，人体对过载的耐受极限是由人体骨骼、血液循环系统及神经系统的承载能力决定的。同时，不同方向、不同作用时间的过载对人的影响也是不同的。除此之外，人的生理和心理状态，人在承受过载时的姿势对耐受力也有影响。例如：人的身体健康，思想上有充分准备，对过载的承受能力则较高；人在低头弯腰姿态承受向上弹射过载的能力显然会降低。

综合上述，过载对人体的影响取决于下列因素：

- 1) 过载值的大小；
- 2) 过载的作用方向；
- 3) 过载的作用时间；
- 4) 过载的变化率；
- 5) 人的生理和心理状态；
- 6) 人在承受过载时的姿态；