



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

苏炳君 编著

现代火箭 弹射救生技术概论

INTRODUCTION TO MODERN ROCKET
EJECTION ESCAPE TECHNOLOGY

航空工业出版社

014057649

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代火箭弹射救生 技术概论

V445.2
03

苏炳君 编著



航空工业出版社

北京



北航

C1742645

V445.2
03

内 容 提 要

本书从回顾弹射座椅发展历程开始,总结出火箭弹射座椅涉及的科学问题和技术要求;分析了国内外典型弹射座椅的技术特点,重点对现代火箭弹射座椅的数值仿真方法和试验验证技术进行了论述;最后一章针对作战飞机向空天发展的趋势,一方面提出了敞开式弹射座椅今后的技术发展趋势,另一方面提出了弹射救生技术的多元化发展方向,即除敞开式弹射座椅外,应加快研究分离式整体座舱、牵引式救生技术,以解决空天飞机、超高速远程作战飞机等新型航空器,在高空、大马赫数、在轨飞行、返回再入等新环境下的救生问题,对直升机、通用飞机的主动救生技术也进行了论述。

本书可供从事防护救生技术的科研、生产和管理人员参考,也可作为高等院校相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

现代火箭弹射救生技术概论 / 苏炳君编著. -- 北京:
航空工业出版社, 2014. 6

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0395 - 9

I. ①现… II. ①苏… III. ①火箭—弹射救生 IV.
①V445. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 091818 号

现代火箭弹射救生技术概论

Xiandai Huojian Tanshe Jiusheng Jishu Gailun

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84934379 010 - 84936343

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2014 年 6 月第 1 版

2014 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 13.25

字数: 335 千字

印数: 1—3000

定价: 90.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。

林左鸣

中国航空工业集团公司董事长

前 言

从人类能够飞行的第一天开始,如何从失事的飞机中安全逃生就成为人们关心的问题。航空救生从降落伞开始,到弹射座椅、个体防护装备,经过一个多世纪的发展,形成了今天完整的防护救生系统技术体系。针对其使用对象——飞行器乘员而言,防护救生系统具有以下功能。一是当飞行器正常飞行时为乘员提供良好的工作环境,以利于乘员更好地发挥飞行器的工作效能。弹射座椅与飞行员个体防护装备、制/供氧装备配套使用,在高空、高速、高过载、强噪声和生化武器等不利环境下,对飞行员的头部、颈部、四肢、躯干、呼吸道等进行有效防护;在飞行中,特别是高空、高过载飞行时,为飞行员及乘员提供呼吸用氧、加压呼吸、抗过载保护;在高空座舱损坏而失去气密、高空弹射跳伞、坠入水下时,实现短期应急供氧。第二,当飞行器发生故障无法挽回时,防护救生系统为乘员救生提供保障,其中弹射救生座椅与降落伞配套使用,实现飞行员应急离机并安全着陆或着水。一个性能优良的防护救生系统可以极大地提高飞行员飞行作战的信心,保证飞行器飞行效能和战斗力的充分发挥。

防护救生系统在应急时按其工作方式可分为迅速逃逸的主动救生方式和提供吸能、防护的被动救生方式。战斗机、轰炸机、教练机等乘员较少的作战飞机普遍使用主动救生方式,即敞开式弹射救生系统;运输机、预警机、侦察机、公务机、民航客机等一般使用非弹射被动救生方式;直升机既可使用主动救生方式,也可使用非弹射被动救生方式。航天救生系统是指可返回式载人航天器和空天飞机中使用的救生系统,可行的方式包括采用密闭式整体分离救生舱、密闭式弹射座椅、敞开式弹射座椅等。

弹射座椅作为防护救生系统的核心装备,经历了半个多世纪的发展,在作战飞机性能的需求牵引下,其功能和性能不断得以完善和提高,已经成为现代作战飞机必不可少的重要机载设备。由于弹射座椅的专业研制投入大等原因,目前全世界仅有美、英、俄和中国4个国家从事该装备研究。我国针对降落伞、个体防护装备、弹射座椅的研究分别从20世纪50年代和60年代开始,走过了从仿研到自主创新的创业道路,尤其自宏伟机械厂、汉江机械厂和中国航空救生研究所三个专业化厂所成立以来,成功研制了大批第二代、第三代防护救生准备,为我国航空事业做出了重大贡献。

2003年12月,宏伟机械厂、汉江机械厂和中国航空救生研究所实现整合,航宇救生装备有限公司成立,在原来3个单位专业发展的基础上,建立起完整的防护救生技术体系(见图1),防护救生装备开始向新一代发展。

本书从回顾弹射座椅发展历程开始,总结出火箭弹射座椅涉及的科学问题和技术要求;分析了国内外典型弹射座椅的技术特点,重点对现代火箭弹射座椅的数值仿真方法和

试验验证技术进行了论述;最后一章针对作战飞机向空天发展的趋势,一方面提出了敞开式弹射座椅今后的技术发展趋势,另一方面提出了弹射救生技术的多元化发展方向,除敞开式弹射座椅外,应加快研究分离式整体座舱、牵引式救生技术,以解决空天飞机、超高速远程作战飞机等新型航空器,在高空、大马赫数、在轨飞行、返回再入等新环境下的救生问题,对直升机、通用飞机的主动救生技术也进行了论述。

苏炳君

2014 年 1 月

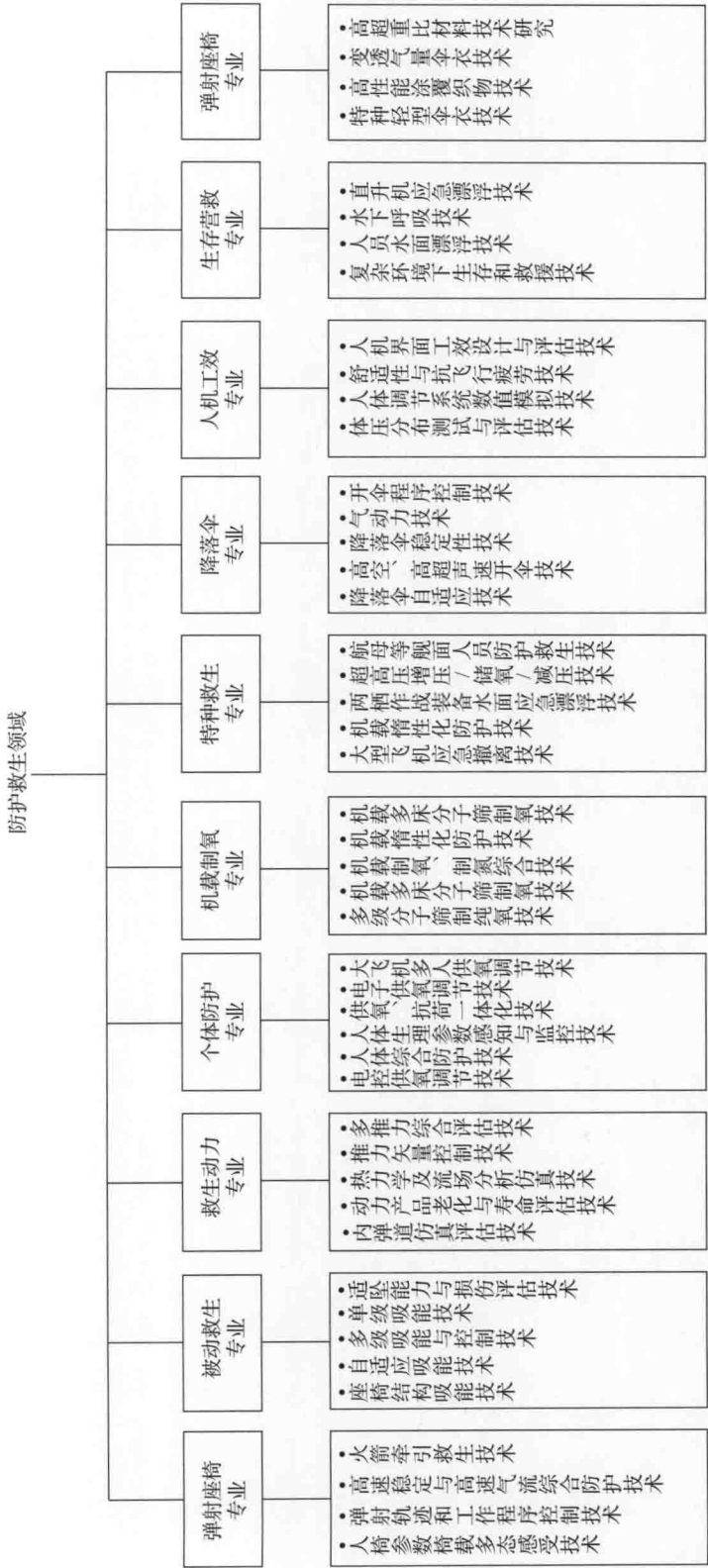


图 1 防护救生技术体系图

目 录

第 1 章 弹射救生技术概述	(1)
1.1 弹射救生技术发展沿革	(1)
1.2 弹射救生系统的技术特征	(3)
1.3 弹射救生涉及的基本问题	(3)
1.3.1 弹射过载	(4)
1.3.2 高速气流吹袭	(6)
1.3.3 复杂环境	(8)
1.3.4 噪声	(12)
1.3.5 开伞动载	(13)
1.4 弹射座椅的设计要求	(14)
1.4.1 救生性能要求	(14)
1.4.2 人体生理及舒适性要求	(15)
1.4.3 座舱协调要求	(18)
1.4.4 “七性”要求	(20)
第 2 章 弹射座椅的结构、工作原理	(26)
2.1 弹射座椅的基本结构	(26)
2.1.1 弹射通道清理系统	(26)
2.1.2 弹射操纵系统	(28)
2.1.3 乘员约束系统	(30)
2.1.4 稳定减速系统	(32)
2.1.5 分离系统	(33)
2.1.6 火工动力系统	(34)
2.1.7 程序控制系统	(47)
2.1.8 救生伞	(61)
2.1.9 救生包	(62)
2.2 弹射座椅的工作程序	(64)
2.2.1 弹射准备	(65)
2.2.2 弹射启动	(65)
2.2.3 弹射通道清除	(65)
2.2.4 弹射离机	(65)
2.2.5 稳定减速	(65)

2.2.6 人椅分离	(65)
2.2.7 稳降着陆	(66)
第3章 特种救生技术	(67)
3.1 多座弹射救生	(67)
3.1.1 多乘员弹射救生的发展过程	(67)
3.1.2 几种典型的多乘员飞机弹射救生技术	(67)
3.1.3 多乘员弹射救生的关键技术	(70)
3.2 高原救生	(73)
3.2.1 高原救生伞	(74)
3.2.2 高原救生程序控制	(74)
3.3 火箭牵引救生	(75)
3.3.1 扬基系统	(76)
3.3.2 奥维系统	(76)
3.3.3 “漫游者”系统	(76)
3.3.4 IRIS 系统	(76)
3.3.5 斯坦泽尔 734 应急离机系统	(76)
3.3.6 K-37 火箭牵引座椅	(78)
3.3.7 SQZ-1 型牵引救生装置	(80)
第4章 国内外典型弹射座椅介绍	(83)
4.1 国外典型弹射座椅	(83)
4.1.1 ACES II 系列弹射座椅	(83)
4.1.2 MK-10 系列弹射座椅	(85)
4.1.3 MK-16 系列弹射座椅	(88)
4.1.4 K-36 弹射座椅	(90)
4.1.5 K-36-3.5 弹射座椅	(92)
4.2 国内典型弹射座椅	(94)
4.2.1 HTY-6 火箭弹射座椅	(94)
4.2.2 HTY-5 火箭弹射座椅	(95)
第5章 弹射座椅主要研究方法	(97)
5.1 弹射座椅数值仿真	(97)
5.1.1 弹射座椅性能仿真	(97)
5.1.2 火工动力装置性能仿真	(111)
5.1.3 救生伞性能仿真	(119)
5.1.4 弹射座椅可靠性评估	(124)
5.1.5 弹射座椅用火工品可靠性评估	(129)
5.2 验证试验	(136)

5.2.1 分系统试验	(137)
5.2.2 地面综合性能试验	(138)
5.2.3 空中飞行弹射试验	(142)
5.2.4 不利姿态弹射试验	(143)
5.2.5 高速气流吹袭试验	(145)
5.2.6 风洞试验	(146)
5.2.7 火工动力装置试验	(148)
5.2.8 结构力学性能试验(动强度、静强度)	(152)
5.2.9 环境适应性试验	(153)
5.2.10 舒适性测量及评价技术	(156)
5.2.11 试验测试技术	(161)
第6章 新时期救生技术发展趋势及展望	(167)
6.1 救生技术发展历程再回顾	(167)
6.1.1 敞开式弹射座椅	(167)
6.1.2 密闭式弹射座椅	(169)
6.1.3 分离式整体座舱	(170)
6.1.4 牵引式救生系统	(171)
6.2 新型航空器对救生技术的发展需求	(172)
6.2.1 空天飞机的救生需求	(172)
6.2.2 超高速远程作战飞机的救生需求	(173)
6.2.3 高机动对地攻击武器平台的救生需求	(174)
6.2.4 直升机的救生需求	(174)
6.2.5 通用航空的救生需求	(174)
6.3 新时期救生技术的发展趋势	(175)
6.3.1 分离式整体座舱的发展趋势	(175)
6.3.2 敞开式弹射座椅的发展趋势	(176)
6.3.3 牵引式救生系统的发展趋势	(195)
参考文献	(198)

第1章 弹射救生技术概述

1.1 弹射救生技术发展沿革

自1783年人类第一次实现气球载人飞行后,便产生了航空应急救生问题。1903年美国莱特兄弟首次实现了动力飞行以后,飞机失事时如何挽救飞行员的生命便提上了议事日程。第一次世界大战期间,约有800名气球观测员从失事的气球上跳伞获救。第二次世界大战中,降落伞已成为军用飞机必备的救生工具。应急时,飞行员首先打开座舱盖,解开座椅安全带,自行爬出座舱跳下,靠自身重量^①打开救生伞,降落至地面。据美国空军统计,1950年美国空军共发生了272次应急离机事故,其中爬出座舱跳伞者253人,占全部救生的93%,跳伞成功率86%。

随着飞机飞行速度的不断提高,单纯靠飞行员的体力爬出座舱跳伞逃生越来越困难。并且大速度情况下跳伞,飞行员容易与飞机机翼、尾翼相撞,当飞机飞行速度达到500km/h时,飞行员必须借助外力才能应急离机救生,于是弹射座椅应运而生。

第二次世界大战快要结束时,德国首先把弹射座椅用作军用飞机飞行员的救生工具。最初的弹射座椅以弹簧或压缩空气作为动力能源,尽管存在诸多不利因素,但这种救生方式在当时也是一种重要的技术进步。1943年,德国试飞员斯切克试飞海因克尔(Heinkel)公司的飞机时,飞机结冰失去控制,正是利用这种压缩空气弹射座椅成功弹离飞机获救,成为第一个用弹射座椅应急离机救生成功的飞行员。到第二次世界大战结束时,至少有60例弹射救生成功的记录。由于压缩空气容器重量大、容易漏气、弹射能量小(难以越过垂尾)等问题,德国、瑞典开始致力于以火药为弹射动力的弹射座椅研制。瑞典从1941年致力于弹射座椅研究工作,1942年在Saab-17飞机上成功进行了假人弹射试验,并于1943年在Saab-21A战斗机上装备了弹射座椅。1944年12月,德国海因克尔公司研制的以弹射弹为动力的弹射座椅装备HE-162飞机首次飞行。

第二次世界大战结束以后,以弹射弹为动力的弹射座椅实物和资料被盟军缴获,英国、美国、苏联等国开始了弹射座椅研究,其中以英国马丁·贝克公司最为出色,其总经理詹姆斯·马丁为弹射救生事业贡献了毕生精力,直到1981年逝世。

弹射救生技术从20世纪中期开始应用于军机,到目前为止,已经历了4个发展阶段。

(1) 第一代弹射座椅

弹射座椅发展的第一阶段大约从20世纪40年代中期到50年代中期。这一时期的座椅以弹射弹为动力,座椅的运动符合弹道学规律,所以称其为弹道式弹射座椅。它主要解决了飞行员在高速条件下的应急离机问题。例如,英国的MK-1、MK-5,苏联的米格-15、米格-17飞机上的弹射座椅等。

^① 本书重量均为质量概念,单位为kg或lb。

英国的马丁·贝克飞机公司是这一时期的典型代表。该公司首先使弹射过程自动化。为了提高弹射机构离机的初始速度,研制了多级套筒或多弹式弹射机构,为拯救飞行员生命做出了贡献。

弹道弹射座椅使用证明,低空救生成功率低是其致命弱点,其中救生失败的60%是由于弹射高度不够造成的,因此应运而生的方案是火箭弹射座椅。

(2) 第二代弹射座椅

弹射座椅发展的第二阶段大约从20世纪50年代中期到60年代中期。这一时期的弹射座椅为火箭弹射座椅。它的主要特征是把火箭作为弹射座椅的第二级动力,在第一级动力弹射机构作用下把人—椅系统推出座舱后,由火箭继续推动人—椅系统向上运动,使其具有更高的轨迹,以解决零高度—零速度(以下简称“零—零”)时的弹射救生的问题,并可以在更高的飞行速度(1100km/h)下应急弹射离机。

在这期间,美国、英国、苏联相继研制成功了火箭弹射座椅,并对当时装备弹道座椅的飞机进行了换装。英国马丁·贝克公司从MK-6到MK-12火箭弹射座椅,美国从洛克希德公司的C-2火箭弹射座椅到麦克唐纳·道格拉斯公司的ACES II火箭弹射座椅,苏联配装在米格-23飞机的KM-1火箭弹射座椅。中国从20世纪60年代末开始从事火箭弹射座椅研究,成功研制了HTY-3、HTY-4火箭弹射座椅。其中,美国的ACES II火箭弹射座椅是性能较好的代表,其倒飞情况下最低安全救生高度达到46m。

(3) 第三代弹射座椅

弹射座椅发展的第三阶段大约从20世纪60年代中期开始一直持续到今天,属于多态弹射座椅的发展时期,其主要特点是采用了速度传感器(电子式/机械式),根据应急离机的飞行速度的不同,救生程序执行不同的救生模式,从而缩短了救生伞低速开伞的时间,提高了不利姿态下的救生成功率。国外现役机种装备的弹射座椅绝大部分为第三代弹射座椅。

目前,国外装机服役的第三代弹射座椅以俄K-36系列、英NACES(MK-14)和MK-16为主要代表。

K-36系列弹射座椅为俄罗斯星星科研生产联合体于20世纪60年代中期研制成功的第三代弹射座椅,目前已生产12000多台,并形成了苏联的通用化系列座椅,其突出特点是高稳定性和高速性能。尤其是在1989年巴黎航展期间,一架装有K-36座椅的米格-29飞机在作机动飞行表演时,因发动机故障造成飞机失速,在极其不利的条件下,飞行员应急弹射成功,安全获救,使K-36系列救生装置名声大振。

NACES(MK-14)是英国马丁·贝克公司为美国海军研制的通用化座椅。装机服役后,便开始了预规划产品改进(PI)计划,该计划的第三阶段计划利用第四代弹射座椅的技术,使NACES具备第四代弹射救生座椅的基本特征。

MK-16系列座椅是英国马丁·贝克公司于20世纪90年代初研究的新式弹射座椅。MK-16系列的主要特点是弹射机构与座椅骨架为一体化设计,不仅重量轻,而且结构紧凑,电子程控器既能与飞机数据总线相接,接收飞机的各种信息,也能感受离机后的信息,以实现自动弹射离机。目前已装机服役EF2000、法国“阵风”、美国JSF等机种。

(4) 第四代弹射座椅

弹射座椅发展的第四阶段实际始于20世纪70年代末期,因而与第三阶段的后期相互交织在一起,平行地向前发展。它的主要特点是实现人—椅系统离机后的姿态控制,其关

键技术是可控推力技术和飞行控制技术。

1984年,美国又开始了为期5年的乘员弹射救生技术(CREST)计划,目标是更加先进,其宗旨是研制出一些先进技术,如高速气流防护技术、可变推力(方向和大小)技术、飞控技术、生命威胁逻辑控制技术等,以减少乘员弹射的死亡和重伤的概率。为了试验验证CREST计划,又开展了多轴滑车(MASE)和先进动态模拟假人(ADAM)研制计划。

我国对弹射救生技术的研究起步较晚,20世纪50年代到60年代末期主要是生产苏联的弹射座椅,如米格飞机系列的弹射座椅等,直到70年代初期才开始第二代火箭弹射座椅的研制,成功研制了HTY-3、HTY-4火箭弹射座椅。80年代开始第三代弹射座椅的研制,研制成功HTY-5、HTY-6、HTY-7等系列第三代火箭弹射座椅,实现了高速发展。第三代弹射座椅具有电子或机械程序控制器,具有多态程序控制能力,可根据弹射离机时的速度、高度选择不同的延迟时间,控制射出救生伞及人椅分离的时机,提高了低空、中低速不利姿态下的救生性能。目前自行研制的第三代弹射座椅已装机服役所有现役作战飞机。

1.2 弹射救生系统的技术特征

弹射救生系统是集机械、电子、火工、气动、纺织、人机工程、航空生理卫生学等多学科于一体的飞行员生命保障装备系统,是保证现代高速作战飞机飞行员正常工作和作战效能,并能在飞机不可挽回的情况下,保证飞行员迅速离机和安全救生不可缺少的关键装备系统。

火箭弹射座椅是一个不规则的飞行器,结构复杂,平时并不工作,应急工作时必须保证可靠和有效,从启动弹射到人椅分离一系列动作在2s甚至零点几秒的时间内完成,工作时间短,技术难度大,可靠性要求极高,稍有问题就可能危及飞行员的生命。弹射救生系统的技术特征是:

- ①集机械、电子、火工、气动、纺织、人机工程、航空生理卫生学等多学科于一体;
- ②集防护、供氧、弹射救生及各种环境下的生存、呼救等功能于一体;
- ③弹射救生过程工作时间短暂,各分系统动作多,自动化程度高,结构复杂,可靠性要求高;
- ④弹射救生过程中弹射过载以及过载变化率、角速度等必须满足人体生理指标要求,而弹射救生系统是一个外形复杂的飞行器,稳定控制难度大;
- ⑤弹射救生系统装备受到干扰因素多,仿真难度高;
- ⑥系统工作环境复杂,分系统功能试验、综合弹射性能试验量大,研制周期长,经费投入高。

1.3 弹射救生涉及的基本问题

应急救生时,火箭弹射座椅首先击发以弹射弹为动力的弹射筒,从而在短时间内使座椅向上加速并脱离飞机座舱。此时乘员在座椅上经受着很大的头—骨盆方向的弹射过载。当座椅离开飞机以后,乘员马上受到迎面气流的吹袭。特别是在高速弹射救生时,迎面气流速压很大,乘员受到很大的气动减速过载。几乎同时,座椅二级动力(火箭包/火箭发动机/椅背火箭)启动,继续将座椅向上推,座椅连同乘员是一个自由体,在空中作六自

由度运动,所以乘员受到不同方向上的气动载荷、过载、座椅旋转所产生的载荷以及随后的开伞等载荷。如果是在高空离机,则座椅连同乘员要经受高空低气压低温的考验,并在较长时间内迅速下降,待降落到一定高度后,打开救生伞,人椅分离,乘员乘救生伞缓慢降落,最后着陆。在整个弹射救生过程中,乘员所承受的力与环境的作用必须是在人体能承受的范围之内,否则就无法实现救生之目的。因此弹射救生装置设计人员一直在围绕解决人体生理耐受限度和救生性能之间的矛盾而开展。在本节简要叙述弹射过载、高速气流吹袭、复杂环境(高空低温低气压、低空不利姿态、海上救生、高原救生)、噪声、开伞动载等因素对人体生理的影响和人体的耐受限度。

1.3.1 弹射过载

当人体的速度改变时,人体本身就要受到惯性力的作用。人体所受惯性力与重力之比称为过载,用 n 表示。过载方向始终与运动加速度方向相反。航空医学上往往把 n 称为“生理加速度”。 n 是一个空间矢量,为便于分析和计算,像速度和加速度一样,标定在直角坐标系的三轴上。 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。

$+n$ 对人体产生三个方面的影响。一是增加体重,二是身体上部血压降低,三是器官和组织移位。

①在 $+n_z$ 的持续作用下,人体和各个器官、组织的重量都随 $+n_z$ 值成比例地增加。 n_z 值在 $+3 \sim +4$ 时,四肢沉重,操作动作不准确; $+4.5 \sim +6$ 时,上述现象更趋严重。

②在 $+n_z$ 的持续作用下,身体上部的动静脉血压降低,血液供应减少;而身体下部的动静脉血压升高,血液蓄积。这种血液转移的后果首先是视觉机能的丧失,随后是意识丧失。随着 $+n_z$ 由小到大,视力逐渐模糊,像透过薄雾看目标那样。也有的人能看到的范围逐渐缩小,这是由周边视力丧失引起的,称为“灰视”,一般在 $n_z + 4.1$ 时发生。当 $+n_z$ 再增加时,什么东西都看不见了,这种现象称为“黑视”,一般在 $n_z + 4.7$ 时发生。发生黑视后,如果这种 n 值再继续作用 $3 \sim 5\text{s}$ 以上,或比发生黑视的 n 值再提高 $0.5 \sim 1.0$,就要出现意识丧失。

③人体的组织和器官如皮肤、胃、心脏等都不是完全固定的。在 $+n_z$ 持续作用下,很容易引起组织变形,器官移位和变形。 n_z 在 $+3 \sim +4$ 时,面部软组织向下移位,膈肌下降,呼吸感到困难,由于内脏向下移位的牵拉和压挤,会感觉不舒服。随着 $+n_z$ 的增加,除感觉疼痛不适外,器官的正常机能活动逐步受到阻碍。其中显著的是呼吸器官。当 $+n_z$ 增大到 $6 \sim 9$ 时,由于膈肌的向下移位,可能出现呼吸暂停。

以上的生理现象是在 $+n_z$ 持续作用下发生的。如果持续时间很短,人体能承受的过载值可以加大。例如,以出现意识丧失为标准,过载作用时间为 0.1s 时, $+n_z$ 可增大到 20,比长时间作用要大 $3 \sim 4$ 倍。

弹射座椅的弹射轴线与靠背的夹角一般不超过 5° 。也就是说,弹射方向与人体的脊柱基本平行。因此,从弹射开始到座椅脱离座舱这一阶段,人体主要承受 $+n_z$ 方向的过载,并且弹射作用时间一般不超过 0.3s 。在这样短的时间内,血液下流和器官移位的现象反应迟缓,但体重增加比较明显,使脊柱容易受伤。通过弹射救生的事例分析发现,脊

柱受伤的概率较大。当人一椅系统处于自由飞阶段时,显然人体会承受 X 轴、 Y 轴、 Z 轴三个方向上的过载,若此时仅以 $+n_z$ 方向的过载来规定人体能承受的冲击过载的方法则显得不尽合理。相比而言,英国、美国和俄罗斯等救生技术强国目前采用多轴动态响应指数 (Multi-axes Dynamic Response Criterion, MDRC) 来衡量乘员生理耐限的方法则显得最为合理。该方法由美国怀特·帕特森空军基地的阿姆斯特朗实验室最先提出。多轴动态响应指数 MDRC 不仅考虑了乘员脊椎方向承受的载荷,同时还考虑乘员胸—背以及横侧向上承受的过载。其中多轴动态响应指数 MDRC 计算方法如下。

首先假设人一椅系统为一个质量—弹簧阻尼系统。根据得到的人—椅系统重心处的三向加速度,通过四阶龙格—库塔法求解二阶常微分方程组式 (1-1)、式 (1-2)、式 (1-3) 中的人体三个方向上的压缩量 δ_{xi} , δ_{yi} , δ_{zi} ,代入式 (1-4)、式 (1-5)、式 (1-6) 求解出三轴向动态响应指数 DRX_i , DRY_i , DRZ_i ,然后分别与表 1-1 中的三轴向乘员生理耐限值 DRX_L , DRY_L , DRZ_L 进行比较,最终代入式 (1-7) 合成评估出人—椅系统的多轴动态响应指数 MDRC。

$$\frac{d^2\delta_{xi}}{dt^2} + 2\zeta_x\omega_{nx}\frac{d\delta_{xi}}{dt} + \omega_{nx}^2\delta_{xi} = \frac{d^2X}{dt^2} \quad (1-1)$$

$$\frac{d^2\delta_{yi}}{dt^2} + 2\zeta_y\omega_{ny}\frac{d\delta_{yi}}{dt} + \omega_{ny}^2\delta_{yi} = \frac{d^2Y}{dt^2} \quad (1-2)$$

$$\frac{d^2\delta_{zi}}{dt^2} + 2\zeta_z\omega_{nz}\frac{d\delta_{zi}}{dt} + \omega_{nz}^2\delta_{zi} = \frac{d^2Z}{dt^2} \quad (1-3)$$

$$DRX_i = \frac{\omega_{nx}^2\delta_{xi}}{g} \quad (1-4)$$

$$DRY_i = \frac{\omega_{ny}^2\delta_{yi}}{g} \quad (1-5)$$

$$DRZ_i = \frac{\omega_{nz}^2\delta_{zi}}{g} \quad (1-6)$$

式中:

$\frac{d^2X}{dt^2}$, $\frac{d^2Y}{dt^2}$, $\frac{d^2Z}{dt^2}$ ——座椅盆椅三向加速度, m/s^2 ;

δ_{xi} , δ_{yi} , δ_{zi} ——人一椅系统模型的三向弹簧压缩量, m ;

ω_{nx} , ω_{ny} , ω_{nz} ——人一椅系统模型的三向自然频率, rad/s ;

ζ_x , ζ_y , ζ_z ——人一椅系统模型的三向阻尼比;

g ——重力加速度, $9.81m/s^2$;

t ——时间, s ;

DRX_i , DRY_i , DRZ_i ——人一椅系统模型的三轴向动态指数。

表 1-1 MDRC 计算用取值表

		动态响应耐限值	自然频率/Hz	阻尼比
DRX_L	$DRX_i > 0$	40	62.8	0.2
	$DRX_i < 0$	35	62.8	0.2

续表 1-1

		动态响应耐限值	自然频率/Hz	阻尼比
DRY _L	DRY _i > 0	18	52.9	0.224
	DRY _i < 0	16.5	52.9	0.224
DRZ _L	DRZ _i > 0	17	58	0.09
	DRZ _i < 0	17	58	0.09

DRX_L, DRY_L, DRZ_L——人一椅系统模型的三轴向生理耐限值。
计算中采用多轴动态响应指数 MDRC, 其定义如下。MDRC ≤ 1 被认为是安全的。

$$MDRC = \sqrt{\left(\frac{DRX_i^2}{DRX_L}\right)^2 + \left(\frac{DRY_i^2}{DRY_L}\right)^2 + \left(\frac{DRZ_i^2}{DRZ_L}\right)^2} \quad (1-7)$$

另外, 在火箭动力熄火以后弹射座椅完全处于自由飞行状态。如果座椅稳定性不好, 或稳定装置不理想, 人一椅系统就要绕自身重心旋转。人体在旋转过程中, 身体每一点的过载都不一样。从生理上看, 脑充血是一个薄弱环节。一般认为人能承受的角速极限值为 2rad/s, 即 720 (°) /s。但美国海军规范于 1983 年已将极限值放宽为 1000 (°) /s。人体的结构是黏弹性体, 其生理功能又非常巧妙复杂。工程师们在确定乘员能承受的生理极限值时应与航空医学专家商讨, 尤其是对变化的和综合的过载作用, 以避免把极限值定得保守或者定得冒进。

1.3.2 高速气流吹袭

当高速物体进入静止的大气层时, 对于物体来说, 受到了高速气流的迎面吹袭。气流的动压力与气流的速度平方、空气密度成正比, 例如, 当量空速 1000km/h 的气流对物体可产生 47400N/m²的动压力。在这种气动力的作用下, 乘员在弹射离机后就受到三种影响: 气动力对人体表面软组织的直接损害、气动力对人体活动部分 (四肢和头部) 的影响以及气动力对人椅造成减速过载的影响。动压对人体表面未加防护的软组织直接造成的损伤, 首先是使颜面变形, 随着压力的增加, 皮下出血和眼结膜出血, 严重时软组织撕裂。如果嘴张开没有保护的话, 气流可吹入肺部, 造成肺部不同程度的损伤。但现在使用弹射座椅的飞行员, 一般都戴头盔, 故在实际弹射造成伤害的事例中气流直接造成的伤害是极个别的。

气流吹到人体各部位, 其动压对各部位施加不同的力。各部位的减速按下列公式计算: 减速过载 = 阻力/重力 = 动压 × 阻力系数 × 迎面面积/重力。人体头部、躯干、四肢的迎风面积、阻力系数和质量都不一样, 一般四肢的减速比躯干的减速要快。这样对四肢可能造成两种伤害情况, 一种是四肢超出肌肉能够控制的活动范围, 造成脱臼、骨折性脱臼和韧带损伤。另一种是四肢向外、向后运动, 不由自主地甩打到座椅的坚硬部件上造成骨折或其他严重损伤。美国的试验表明, 身体在无支持的情况下, 约 29500N/m²的动压 (当量空速 790km/h) 即可使肢体造成肌肉难以控制的甩打。动压到 36300N/m² (当量空速 873km/h) 时, 可以在 0.1s 内使髋关节完全外展。动压再增加, 负荷可超过四肢大关节能承受的强度。英国的试验又表明, 在当量空速 740km/h 吹袭时, 作用在膝部使腿向外分开的力有 490N。如果座椅不稳定, 偏航转动 30°, 则作用在腿上使其向外分开的力会达到上述力的 3 倍。根据美国空军 1971—1978 年 8 年时间内非战斗弹射的统计资料, 在