



运输类 飞机舱门设计

The Doors Design of Transport Airplane

姚雄华 邓军锋 冯蕴雯 主编

钟至人 张柱国 主审



国防工业出版社
National Defense Industry Press

运输类飞机舱门设计

The Doors Design of Transport Airplane

姚雄华 邓军锋 冯蕴雯 主编
钟至人 张柱国 主审

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书对运输类飞机舱门的定义、功用、分类与形式及部分舱门的特点进行了介绍,总结了运输类飞机舱门的设计要求、设计流程和主要工作内容,从总体布置、载荷选取、结构与机构设计、密封设计、分析与仿真、电气控制与告警以及相关试验等方面对运输类飞机舱门的研制进行了较全面的论述,并对部分典型舱门设计进行了实例分析。此外,本书较详细地叙述了舱门的可靠性、安全性设计和分析方法及流程,对运输类飞机舱门适用的主要适航条款进行了细致解读,并给出了舱门常见故障的处理方法。最后,展望了运输类飞机舱门的技术发展与创新设计方法。

本书主要以我国运输类飞机设计、制造与使用维护工程技术人员为读者对象,力求科学严谨、实用可行、浅显易懂,可供通用飞机、旋翼机工程技术人员参考,也可作为航空高等院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

运输类飞机舱门设计/姚雄华,邓军锋,冯蕴雯主编.

—北京:国防工业出版社,2017.3

ISBN 978-7-118-11180-4

I. ①运… II. ①姚… ②邓… ③冯… III. ①运输机—
飞机门—设计 IV. ①V223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 030636 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 24 字数 442 千字

2017 年 3 月第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 108.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

运输类飞机舱门在全机结构中的重量占比不大,军用和民用运输机分别约为 7%和 5%,但舱门的设计、分析与试验的工作量达到全机结构总工作量的 10%以上。据波音公司统计,B707 飞机 1 号登机门的设计工时为 7118 人·时,而 B757 飞机 1 号登机门增加到 28686 人·时;B747 飞机 8 个登机门、服务门的设计工时为 69203 人·时,而 B777 相应的 8 个舱门增加到 163160 人·时。可见,随着运输类飞机的发展,从表象看,舱门的研发工作量呈现快速增长趋势;但从深层次看,主要原因是舱门的设计要求越来越高,研发活动愈加复杂。

运输类飞机舱门是集机、电、液为一体的复杂系统。从舱门功能来说,舱门不仅要在正常情况下反复使用,保证人员、货物、装备等通畅、顺利进出机舱,有些舱门还要在应急情况下能够有效使用,确保人员快速、安全撤离。从舱门设计需求来看,舱门不仅要满足强度、刚度和寿命等力学特性要求,满足重量、可靠性、安全性、维修性等设计指标要求,还要具有良好的人机工效品质。可见,舱门的功能与设计需求多种多样,矛盾突出,需要舱门设计人员综合平衡、合理取舍。

在人类百年的航空史上,运输类飞机的舱门曾经暴露出许多问题,甚至有些酿成灾难性事故。这些血淋淋的教训,不断推动着运输类飞机适航标准的发展。美国联邦航空管理局(FAA)自 1965 年 2 月制定 FAR25 以来,分别于 1967 年 10 月、1970 年 5 月、1980 年 10 月、1990 年 8 月、1996 年 12 月与 2004 年 6 月颁布了 FAR25-15、FAR25-23、FAR25-54、FAR25-72、FAR25-88 与 FAR25-114 修正案,从安全性角度,对运输类飞机舱门提出了更全面、更细致与更严格的设计要求。《中国民用航空规章》第 25 部《运输类飞机适航标准》自 1985 年 12 月发布以来,已先后于 1990 年 7 月、1995 年 12 月、2001 年 5 月和 2011 年 11 月进行了 4 次修订,现行有效的标准是 CCAR25-R4。对于舱门来说,CCAR25-R4 的要求相当于 FAR25-114 修正案的水平。已于 2014 年 12 月取得中国民航型号合格证的 ARJ21 飞机所符合的适航标准是 CCAR25-R3,而对于我国正在研发的 C919 与 MA700 飞机,必须满足 CCAR25-R4 的要求,即将研发的宽体大型客机将视 CCAR 25 修订情况,满足该型号合格审定申请时现行有效最新版本的要求。

波音、空客和庞巴迪等西方公司经过几十年的高速发展,已形成了民用运输类飞机干线、支线市场垄断的格局。舱门设计已成为美国、欧盟各成员国重点保护的关键技术之一,对我国实施严格技术封锁,或在我国开展了知识产权保护布局。虽然我国从20世纪80年代就开始承揽波音、空客飞机的舱门转包生产,但按图来料的转包生产不可能让我国掌握舱门设计的核心技术,这在后续研制的MA60与ARJ21飞机上得到了充分体现。从MA60与ARJ21飞机舱门研制暴露的诸多问题来看,表明我国对适航规章的理解不透彻,可靠性与安全性设计、分析的方法还没掌握,也大量缺乏舱门研发的高水平人才。

本书尝试从全面总结国内外运输类飞机舱门的发展历程、技术现状、特点和舱门设计各相关要求出发,概述了研发各阶段舱门设计的主要工作内容,细致解读了舱门相关适航条款要求,重点介绍了舱门可靠性、安全性与适航性设计与验证方法,并对典型舱门实例进行了分析,最后简要提出了舱门设计的创新方法。作者希望通过本书能够引起国内运输类飞机的专家、同行对舱门研发重要性的认识,能够对C919与MA700飞机和未来的宽体大型客机的研发提供一些帮助,并为切实提高我国舱门研发水平、培养技术人才方面能够起到较好的推动作用。

本书是中国航空工业第一飞机设计研究院结构设计研究所舱门设计研究室与西北工业大学航空学院飞行器设计研究所共同合作的结晶。姚雄华研究员牵头编写了第1、2、5、6、7、8、12和14章,邓军锋研究员牵头编写了第3、4、9、10和13章,冯蕴雯教授编写了第11章。参加部分章节编写有高明亮、张琦、冯冬翔、吴海弟、刘万春、郑香伟、刘小飞、张鹏、蒋立宅、刘文光、任晓炜、范东、耿彦芳、王小军、张宇龙、魏海洋、王文浩、高海燕、陈继玲、李颖、刘韩巍、肖允庚、苏爱民和张引利等。西安航空职业技术学院陈兴虎教授提供了部分参考资料,并对本书部分章节提出了修改意见。本书由国内飞机结构强度专业著名专家、西安飞机设计研究所原副总设计师钟至人研究员和中国民航上海航空器适航审定中心张柱国高工任主审,他们对本书提出了许多宝贵的修改意见。在本书编写与出版过程中,得到了第一飞机设计研究院冯军副院长、段卓毅总设计师的关心,得到了结构设计研究所王乾平所长、朱胜利书记的支持,得到了总师办周卫国主任、科技委郭圣洪副主任和科技信息档案研究所许云峰研究员的帮助,结构设计研究所助理工程师王琛与总师办助理刘红娟对部分图文进行了编辑。在此,一并表示感谢。

本书编著历经四年,几易其稿,推敲求真,力求完善。但由于编者水平有限、经验不足、资料匮乏,不妥之处在所难免,敬请各位读者批评指正。

姚雄华

2016年11月

目 录

第1章 总论	1
1.1 舱门定义与范围	4
1.2 舱门功用	4
1.3 舱门分类	5
1.3.1 按用途分类	5
1.3.2 按开启方式分类	8
1.3.3 按密封形式分类	8
1.4 舱门形式	8
1.4.1 堵塞式舱门	8
1.4.2 半堵塞式舱门	9
1.4.3 非堵塞式舱门	10
1.5 舱门设计发展历程	11
1.6 舱门设计依据	11
1.7 设计流程和主要工作内容	12
1.7.1 设计流程	12
1.7.2 主要工作内容	13
第2章 设计要求	15
2.1 总体布置与重量要求	15
2.2 外形阶差与间隙要求	15
2.3 强度、刚度与寿命要求	17
2.4 锁定要求	18
2.5 密封要求	18
2.6 内装饰要求	19
2.7 告警、指示要求	19
2.8 开启力与开启时间要求	19
2.9 可靠性与安全性要求	20
2.10 维修性要求	20

2.11	水上迫降要求	21
2.12	人机工效要求	21
2.13	使用环境要求	21
2.14	适航要求	22
2.14.1	第 25.783 条款 机身舱门	22
2.14.2	第 25.795 条款 保安事项	23
2.14.3	第 25.801(e) 条款 水上迫降	23
2.14.4	第 25.807 条款 应急出口	23
2.14.5	第 25.809 条款 应急出口的布置	23
2.15	使用维护要求	24
2.16	经济性要求	25
第 3 章	舱门总体布置	27
3.1	概述	27
3.2	舱门布置	28
3.3	客机应急出口布置	34
3.3.1	相关要求	34
3.3.2	应急出口布置的均匀性	44
3.3.3	旅客应急出口均匀分布的计算分析方法	46
3.3.4	型号应急门布置优化设计应用示例	50
3.4	军用运输机应急出口布置	58
3.5	货舱门布置	60
3.6	舱门布置的结构设计考虑	62
第 4 章	舱门载荷	63
4.1	安全系数	63
4.2	飞行与气密载荷	63
4.3	地面载荷	64
4.3.1	突风载荷	64
4.3.2	随机载荷	64
4.3.3	手柄载荷	64
4.3.4	应急打开载荷	65
4.4	破损安全载荷	65
4.5	水上迫降	66
4.6	驾驶舱门防侵入载荷	66
4.7	军用运输机后货舱门载荷	66

第5章 舱门设计与分析基础	67
5.1 运动机构设计基础	67
5.2 舱门受力特性及载荷传递	68
5.2.1 堵塞式、半堵塞式舱门受力特性及载荷传递	69
5.2.2 非堵塞式舱门受力特性及载荷传递	71
5.2.3 军用运输机后货舱门受力特性与载荷传递	74
5.3 舱门运动学设计基础	77
5.3.1 运动学基本概念	77
5.3.2 舱门机构运动学仿真	78
5.4 舱门动力学设计基础	78
5.4.1 动力学基本概念	78
5.4.2 舱门动力学建模对象	79
5.4.3 舱门动力学仿真分析步骤	79
5.5 舱门强度分析方法	79
5.5.1 有限元素法结构分析	80
5.5.2 边界	82
5.5.3 载荷	82
5.5.4 有限元计算时应遵守的原则	83
5.5.5 计算结果与强度结论	84
5.5.6 舱门有限元分析过程中应注意的问题	84
5.6 舱门优化设计基础	86
5.6.1 结构优化一般知识	86
5.6.2 舱门优化设计流程	88
第6章 舱门初步设计	90
6.1 舱门方案优选	90
6.1.1 舱门开启方式和舱门形式的选择	90
6.1.2 舱门增压预防措施的选择	94
6.2 机构交点位置协调与定义	96
6.2.1 机构组成定义	97
6.2.2 定义机构交点位置需要考虑的因素	100
6.2.3 机构运动原理	101
6.3 结构布置方案设计	102
6.3.1 概述	102
6.3.2 舱门结构的布置与组成	103

6.3.3	结构初步设计需考虑的因素	103
6.3.4	舱门结构初步设计示例	104
6.4	系统要求协调	106
6.4.1	与液压系统的协调	107
6.4.2	与电气系统的协调	107
6.4.3	与货运系统的协调	108
6.4.4	与内饰专业的协调	108
6.5	运动空间协调	109
第7章	舱门详细设计	111
7.1	交点位置综合协调	111
7.1.1	堵塞式、半堵塞式舱门交点的协调	111
7.1.2	非堵塞式舱门交点的协调	113
7.2	结构详细设计	113
7.2.1	技术协调冻结	114
7.2.2	结构优化设计	114
7.2.3	定义连接和选用紧固件	116
7.2.4	零组件细节设计	116
7.2.5	重量控制	117
7.2.6	维修性设计	118
7.2.7	防、排水设计	118
7.3	机构详细设计	119
7.3.1	锁闭机构	119
7.3.2	提升机构	120
7.3.3	手柄机构	122
7.3.4	助力、缓冲与平衡机构	124
7.3.5	机构优化设计	126
7.3.6	机构补偿设计	126
7.4	系统界面设计	131
7.5	运动学、动力学仿真分析	131
7.5.1	运动学仿真分析	132
7.5.2	动力学仿真分析	133
7.6	强度、刚度与抗疲劳/耐久性设计分析	138
7.6.1	应力分析	138
7.6.2	强度分析	138

7.6.3	刚度控制分析	140
7.6.4	抗疲劳与耐久性设计分析	140
7.6.5	损伤容限和疲劳评定	141
7.7	绝热隔音和内饰设计	141
7.8	安装与调整技术要求编制	142
第8章	舱门密封设计	144
8.1	概述	144
8.2	舱门密封结构形式	144
8.2.1	充气管密封	144
8.2.2	空心管形压缩密封	147
8.2.3	脚形压缩密封	150
8.2.4	隔膜压缩密封	153
8.2.5	包覆填充物压缩密封	154
8.2.6	舱门开启方式对密封结构形式的影响	155
8.3	舱门密封带材料	156
8.3.1	密封带材料的主要性能指标	156
8.3.2	橡胶密封材料的选择原则	156
8.3.3	适用于舱门密封带的橡胶材料	158
8.3.4	国内外飞机舱门密封材料应用情况	161
8.3.5	舱门橡胶密封材料的增强措施	163
8.4	密封带仿真分析	164
第9章	舱门电气控制和告警设计	168
9.1	舱门的电气操纵控制系统	168
9.2	位置信号装置	174
9.2.1	位置信号装置的特点	176
9.2.2	舱门位置信号装置的安装	177
9.3	应急舱门的飞行锁电气控制	178
9.4	舱门的告警系统	181
第10章	舱门设计实例分析	185
10.1	登机门设计实例分析	185
10.1.1	伊尔 76 飞机登机门实例分析	185
10.1.2	新舟 600 飞机门梯合一登机门实例分析	189
10.2	服务门实例分析	195
10.2.1	ARJ21 飞机服务门实例分析	195

10.2.2	新舟 60 飞机服务门实例分析	199
10.3	应急舱门实例分析	205
10.3.1	机组应急门实例分析	205
10.3.2	水上应急舱门实例分析	206
10.3.3	后应急门实例分析	211
10.4	货舱门实例分析	215
10.4.1	侧货舱门实例分析	215
10.4.2	B787 飞机货舱门实例分析	218
10.4.3	伊尔 76 飞机后货舱门实例分析	221
10.5	起落架舱门实例分析	230
10.5.1	主起舱门结构	230
10.5.2	主起舱门收放机构	231
10.6	内部舱门实例分析	235
10.6.1	驾驶舱舱门概述	235
10.6.2	电子锁	236
10.6.3	泄压保护	237
10.6.4	应急出口	238
10.6.5	控制逻辑	238
10.7	新型舱门实例分析	238
10.7.1	铸造舱门	238
10.7.2	复合材料舱门	243
第 11 章	舱门适航性、可靠性、安全性设计与验证	257
11.1	概述	257
11.2	适航性	257
11.2.1	舱门适航性要求的概况	257
11.2.2	舱门相关主要适航条款解读	261
11.3	可靠性与安全性	275
11.3.1	故障状态影响等级、概率及功能研制保证级别	275
11.3.2	舱门故障模式与统计分析	276
11.3.3	舱门安全性分析	281
11.3.4	舱门可靠性设计	288
11.3.5	舱门可靠性试验评估	306
11.3.6	舱门可靠性、安全性设计与分析案例	309
11.4	舱门符合性验证方法	313

第 12 章	舱门试验	316
12.1	概述	316
12.2	舱门选型试验	321
12.2.1	试验目的	321
12.2.2	试验内容	321
12.2.3	试验件设计	322
12.3	舱门功能试验	322
12.3.1	试验目的	323
12.3.2	试验内容	323
12.3.3	试验件设计	325
12.4	舱门人机功效试验	325
12.4.1	试验目的	325
12.4.2	试验内容	325
12.4.3	试验件设计	325
12.5	舱门可靠性试验	326
12.5.1	一般知识	326
12.5.2	试验目的	326
12.5.3	试验分类	327
12.5.4	试验一般流程	328
12.6	舱门机上试验	329
12.6.1	试验目的	329
12.6.2	试验程序	329
12.7	舱门试验示例	329
第 13 章	舱门常见故障处理	346
13.1	概述	346
13.2	漏气	346
13.3	漏水	348
13.4	卡滞	349
13.5	手柄力超差	349
13.6	阶差、间隙不满足要求	350
13.7	虚报警	351
13.8	其他故障	352
13.8.1	腐蚀	352
13.8.2	划伤、碰伤	352

13.8.3	构件损伤或断裂	352
13.9	小结	353
第 14 章	舱门创新设计	354
14.1	舱门专利现状分析	354
14.1.1	引言	354
14.1.2	专利的作用与分类	354
14.1.3	我国飞机舱门专利现状分析	355
14.1.4	国外飞机舱门专利现状	360
14.1.5	国内外舱门专利差距简析	363
14.2	波音、空客飞机客舱舱门技术发展现状	363
14.2.1	波音飞机客舱舱门技术发展现状	363
14.2.2	空客飞机客舱舱门技术发展现状	364
14.3	TRIZ 创新法在舱门中的应用探讨	364
名词术语		366
参考文献		371

第 1 章 总 论

自飞机问世以来,经过一个多世纪的飞速发展,运输类飞机在飞机众多种类中占有越来越重要的地位。现代运输类飞机包括军用运输机和民用运输机。

军用运输机是用于运送军事人员、武器装备和其他军用物资,具有较大的载重量和续航能力,能实施空运、空降和空投,保障地面部队从空中实施快速机动的飞机。它具有较完善的通信、领航设备,能在昼夜复杂气象条件下飞行。有些军用运输机还装有自卫武器。按执行任务划分,军用运输机分为战略运输机和战术运输机。

战略运输机是指主要承担远距离、大量兵员和大型武器装备运送任务的军用运输机。其特点是:①载重能力强、航程远,起飞重量一般为 150t 以上,载重量超过 40t,正常装载航程超过 4000km;②能空降、空投和快速装卸。美国的 C5(图 1-1)、俄罗斯的 An225(图 1-2)等都属于这类飞机。



图 1-1 C-5“银河”战略运输机



图 1-2 安-225“梦幻”运输机

战术运输机是指主要在战区附近承担近距离运输兵员及物资任务的军用运输机。其一般为中小型飞机,主要用于在前线战区从事近距离兵员运输、后勤补给、空降伞兵、空投军用物资和运送伤员,其特点是载重量较小,主要在前线的中、小型机场起降,有较短的起降距离。典型机型有美国的 C-130(图 1-3)、乌克兰的 An12(图 1-4)和中国的运-8(图 1-5)。

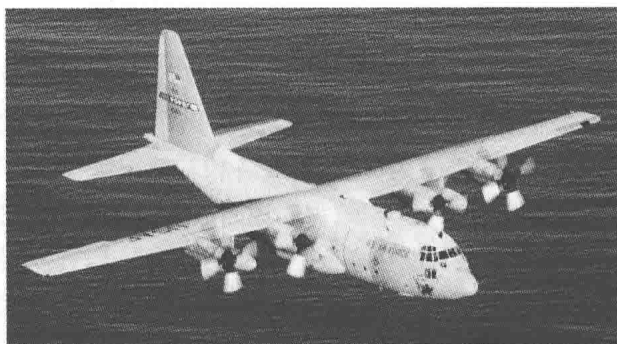


图 1-3 C130 “大力神”运输机



图 1-4 An12 运输机



图 1-5 运 8 运输机

为提高战场使用的灵活性,将战略、战术运输机合二为一,如美国的 C17“环球霸王”运输机(图 1-6)。



图 1-6 C-17“环球霸王”运输机

民用运输机是指用于从事乘客或货物运输的飞机。按用途分为客机和民用货机；按起飞重量，分为小型、中型、大型民用运输机；按航程划，分为短程、中程、远程民用运输机。客机机身内布置有驾驶舱、客舱、行李舱（或货舱）和服务舱；而民用货机除驾驶舱外，基本上全部布置为货舱。为了保证旅客的安全、舒适，客机客舱都是增压密封舱，舱内配备有旅客座椅，以及空调、供氧、救生等生活服务和安全保证设备。货机舱内设有装卸货物和集装箱的辅助设备，如起重、滑动装置和货物固定设备等。图 1-7 为 B747 飞机。出于经济性考虑，民用货机绝大多数利用退役客机改装而成，当然也有客机衍生的民用货机，如 B747-8F 就是 B747-8 系列衍生的货机。

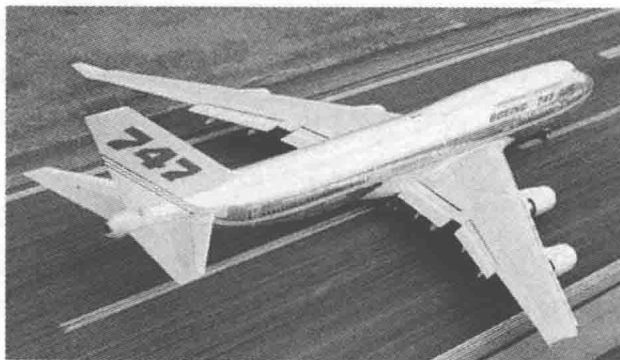


图 1-7 B747 飞机

不管是军用运输机还是民用运输机，也无论是人员还是物资的运送，均需要在承担装载功能的机身舱段上开设能够方便人员或货物进出的通路，或为了系统设备的安装、维护需在机体上提供通路。因此，现代运输类飞机要在机体的适当位置设置足够大、足够多的舱口，才能满足不同的需求。同时，为了保证紧急情况下，乘员（含机组、乘客）的迅速撤离，机身上还需要布置应急出口。并且飞机在飞行中，需要通过舱门来封闭各类开口，从而保证飞机的完整外形、气密特性和安全性。因此，舱门成为运输类飞机机体结构非常关键的组成部分。

1.1 舱门定义与范围

舱门由结构、机构、驱动系统(如液压装置、电气装置或液电组合装置)、告警系统等组成,用于为乘员、货物进出机舱或为大型机载设备安装、维护等提供通道的飞机部件级系统。一般说来,不同尺寸、不同用途的舱门组成会有所差异。

从广义而言,舱门应为运输类飞机上所有不需要使用工具开启的门与窗户的统称,包括机身外部的登机门、服务门、应急门(含机组应急出口)、货舱门、设备使用或维护舱门、起落架舱门、通风窗和军用运输机特有的跳伞门等,也包括机身内部的驾驶舱舱门、盥洗室门和机组休息室门等。

为突出重点,本书将对登机门、服务门、应急门和货舱门的设计要求、内容、流程及相关试验等做详细叙述,对起落架舱门、驾驶舱舱门的设计仅以实例做简单介绍,而对设计相对简单的设备使用或维护舱门(如冲压空气涡轮舱门、辅助动力装置舱门等)、盥洗室门和机组休息室门不予赘述。军用运输机的登机门一般作为跳伞门使用,另外专门开设的跳伞门相比登机门设计要简单,本书也不再赘述。

对于通风窗,现代运输类飞机设计呈现两种设计理念,大部分飞机仍保留设计有通风窗,如 A380、A350、A400M、C17、An70、新一代 A320NEO 和 B737MAX、ARJ21、MA60 与 MA700 等,而 B787、C919 与庞巴迪的 C 系列等飞机没有设计通风窗,用机组应急出口取代了通风窗应急撤离的功能,随着除冰、除雾、通风、通信和地面盲降技术与系统设备的发展,取消设计相对复杂、重量较重的通风窗应该是未来运输类飞机的发展趋势。另外,通风窗除一般要增加具备抗鸟撞功能和透明件的特性外,其他功能,如密封、抗压、机构锁定与应急撤离等与登机门等舱门类似,且没有增压预防、防人为开启等要求,机构设计相对简单。因此,本书对通风窗的设计也不再做过多介绍。

1.2 舱 门 功 用

舱门最主要的功用就是为乘员、货物进出机舱或大型机载设备安装、维护提供通道。安装在飞机外表面的舱门,在关闭时取消应具有维持飞机气动外形的功能;安装在增压舱内区域的舱门,在关闭时应密封具有保证飞机安全增压的功能;所有舱门应具有足够的强度、刚度,在预定的各种载荷作用下,具备保证结构