

机载电源系统设计

参考资料

I. 系统设计原理

II. 系统要求



国外航空编辑部

1977

出版说明

根据伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的指示，考虑到我国航空工业发展的需要，我们把美国海军武器局 1964 年出版的一本设计手册——《海军飞机和导弹电气系统设计》中的一些章节翻译出版，以供本专业的工人和技术人员在设计航空交流电源系统和部件时参考。

《海军飞机和导弹电气系统设计》一书共十章，这次先出版第二章“系统设计原理”和第三章“系统要求”。为了便于读者参考，将原文各章节的目录译出作为附录放在最后。根据需要，第二章中只选了“影响设计的基本因素”和“系统最佳设计”两节；同时考虑到第三章中“直流系统起动”一节的内容已为广大读者所熟悉，而“交流系统起动”一节的内容还未见到广泛的应用，故将这两节删去。另外，由于原文资料是缩微卡，一些图片和曲线图上的说明放大后根本看不清，只得删去。

由于我们外文水平低、专业知识有限、对一些习惯叫法也不熟悉，因而翻译不当、概念不清之处实为难免。为此，希望读者阅后提出批评和意见。

目 录

I. 系统设计原理.....	(1)
一、影响设计的基本因素.....	(1)
1. 概述.....	(1)
2. 性能.....	(1)
3. 重量.....	(1)
4. 空间.....	(2)
5. 环境因素.....	(3)
(1) 概述.....	(3)
(2) 气候因素.....	(3)
(3) 机械因素.....	(5)
(4) 化学和核因素.....	(6)
6. 可靠性.....	(7)
7. 安全.....	(7)
8. 成本.....	(8)
9. 经济方法研究.....	(9)
10. 工程标准.....	(10)
11. 设计时间.....	(11)
二、系统最佳设计.....	(12)
1. 概述.....	(12)
2. 系统的最佳控制.....	(12)
3. 系统功能控制.....	(13)
4. 正常运行参数控制.....	(14)
(1) 直流系统.....	(14)
(2) 交流系统.....	(14)
5. 保护系统的最佳化.....	(16)
6. 各设计因素的平衡.....	(17)
(1) 比较关系的确定.....	(17)
(2) 采用折衷方法得到最佳的平衡.....	(18)
参考资料和文献 (删去)	

II. 系统要求	(19)
一、电气负载分析	(19)
1. 收集数据的方法.....	(19)
2. 标准加载状态.....	(22)
(1) 导弹运行状态.....	(23)
3. 备分容量.....	(24)
4. 单个负载的型式.....	(24)
5. 系统负载的型式.....	(25)
(1) 主负载.....	(25)
(2) 次级负载.....	(26)
(3) 监控负载.....	(26)
(4) 重要负载.....	(26)
6. 负载分类和平衡.....	(29)
(1) 概述.....	(29)
(2) 直流负载 (可调和不可调的).....	(29)
(3) 恒频交流负载.....	(29)
(4) 变频交流负载.....	(30)
(5) 负载平衡.....	(30)
7. 地面电源负载.....	(30)
二、电气参数分析	(31)
1. 负载分析.....	(31)
2. 运行状态对系统参数的影响.....	(32)
3. 电源系统的瞬变特性.....	(33)
4. 负载的瞬变特性.....	(33)
5. 电源中断极限.....	(34)
6. 电源的短路特性.....	(35)
三、运行环境条件分析	(35)
1. 任务剖面图的研究.....	(35)
2. 传热的方式.....	(36)
3. 工作环境.....	(40)
4. 运行温度.....	(40)
四、设备的冷却要求、方法和问题	(41)
1. 鼓风冷却.....	(41)
2. 滑油冷却.....	(43)
3. 专用的冷却方法.....	(44)
五、发电机与原动机的一致性	(46)
1. 发动机起动特性的确定.....	(46)

(1) 概 述	(46)
(2) 要 求	(47)
2. 直流系统起动 (删)	(47)
(1) 活塞发动机的起动	
(2) 喷气发动机的起动	
(3) 负载分析数据	
(4) 外部起动电源	
3. 交流系统起动 (删)	(47)
(1) 恒频系统	
(2) 变频系统	
4. 发电机装置和原动机的适应性	(47)
(1) 考虑因素	(47)
(2) 典型计算	(49)
六、系统的功率因数	(51)
1. 概 述	(51)
2. 要 求	(52)
3. 避免校正功率因数的几种方法	(52)
4. 校正装置的应用	(52)
5. 所要求电容的计算方法	(53)
(1) 例 A, 把负载功率因数校正到 1	(53)
(2) 例 B, 把负载功率因数校正到小于 1	(54)
6. 采用电容器校正功率因数时出现的问题	(54)
参考资料和文献 (删去)	

I. 系统设计原理

一、影响设计的基本因素

1. 概述

在本章的前面从基本设计因素在一般工业中占的重要性次序的观点出发，对基本设计因素进行了讨论，并与飞机和导弹工业的情况作了比较。在下面几节中，详细地讨论了在飞机或导弹电气系统设计中，要求特殊考虑的主要因素。这些因素不能按重要性次序排列，因为每一个因素在整个设计中都成为不可缺少的环节。正常运行的电气系统对武器系统的效能同样是影响极大的。

2. 性能

每一种导弹或飞机都是为了执行预定任务的单一目的而设计的。要完成它的任务，飞行器必须按规定去做。电源系统将对作为综合武器系统的飞行器的作战效率产生影响。要达到此目的，电源系统必须在飞行器全部工作状态下具有：

- a. 为正常和应急工作状态所要求的、具有足够的稳态和过载容量的电源型式。
- b. 使系统参数保持在规定的设计极限范围内的系统响应特性。
- c. 按规定完成的控制功能。
- d. 按规定完成的保护功能。
- e. 使在系统中感受到或产生的假信号不引起通信干扰或电路故障的干扰控制。
- f. 在系统设计寿命的全部期间，能可靠地重复规定的性能。

影响系统设计的其他重要因素在下面讨论，但没有考虑性能因素。

3. 重量

对飞机和导弹工业的工程师来说，重量因素可能是个较新的设计参数。在这里较详细地讨论这个问题，以在整个电气系统设计期间强调考虑重量的重要性。早在零部件设计之前，制造商就向用户担保飞行器的性能、重量、飞行特性和其他要求。在详细要求中所包括的是像各种高度下的最大速度、爬升率、加速度、航程、空中待命时间、着陆速度、有效载荷重量和总重那样的特性。如果重量未能保持在规定的极限范围内，要能满足性能保证是不大可能的，因为性能特性的计算是根据担保的重量进行的。因此，过分重的重量是受不了的。而且，只满足设计中的重量极限那是不够的。作为设计的目标，是希望系统工程师和其他的工程师通过减少系统的重量来提高保证的特性。很明显，在保证总重不变的条件下，如果减轻系统的重量，就能装更多的燃油或更多的有效载荷，这就提高了性能，而减小了着陆速度和空

重。

通常要向系统设计者提供他所搞的系统的“重量分析”资料。要记住这一点，即各设计组相互合作能把重量调整到使飞行器的整个重量最佳化。例如，分包商接受一项四台设备 210 磅指标重量的任务，计划已规定用四立方呎的增压体积来容纳这些设备的组件。分包商为了努力满足给他的指标重量要求，就重新包装他的部件。这一改变的结果使设备减轻了 8 磅，并把两个组件改放到无增压的隔舱内。根据承包商的工程师进一步研究，发现把两个组件改放到无增压的舱内将要求附加 10 磅的框架重量，再加上重新设计，即附加导线、冷却设备和结构修改带来的 6 磅重量。这时飞行器净重的变化是增加了 8 磅。如果重量分析就此告一段落，就不必让设备制造商重新包装他的设备了，因为减轻了 8 磅的设备重量反而使总重量增加了 8 磅。这表明任何附加重量都有个“滚雪球”的效应，因为往往要求附加结构以及必须增加额外的燃油，以维持原来保证的航程和性能。随着燃油的增加、体积的增大、结构重量的进一步增加，为了重新满足性能要求必须重复前面的程序，即要求更多的燃油、更大的体积、更重的结构重量。通常使用的增长因数为 10，它包括预料的发动机功率增长因数，以保持全部性能的完整性。于是，设备重量增加 8 磅，会使飞行器总重增加 80 磅。但是，在例子中把两个设备组件改放到无增压的隔舱中，使得飞行器的承包商能减少增压舱体积二立方呎，节省了结构重量 20 磅。由于分包商进行重新包装，那么每个飞行器净重减轻 12 磅。这样，使得整个飞行器的性能得到了改进。值得再次强调的是：在实现设备和系统重量最小时，工程师决不能忽略对整个飞行器的影响，设备或成品重量最轻未必导致飞行器重量最小。在研究机载设备时，制造商可能只倾向于集中力量在性能、适用性和价格方面，而对重量因素未充分地考虑。这一情况对目前的飞机和导弹来说已成为极关键的问题。当然，今天考虑重量的紧迫性的增长超过了第二次世界大战的时代，这主要是每架飞机设备总重量增加的结果。从 1954 年到目前，设备重量对结构重量的百分比已从百分之七增长到十二。设备的重量很快地将接近飞行器空重的百分之十。超重问题有时达到严重的程度。在这种场合下，成本逐渐地上升，而且必需减轻重量的系统设备每磅可能花数千美元。从系统设计计划开始到结束，系统设计者通过最大限度地运用有关减轻重量的创造性和发明，就可能有助于避免这种费钱的、令人讨厌的困境。当供应商对满足设备重量极限有困难时，电气设计者常常能够而且应该帮助解决这个问题。将来，飞机和导弹将越来越复杂，所安装的“黑匣子”数量将按比例增长。如不损害性能，减轻重量的方法必须跟上飞机和导弹的发展。在可以预见的未来，轻重量将一直是航空飞行器设计的主要目标。

4. 空间

空间因素是非常重要的因素；有时，特别在导弹中，其重要性超过了重量因素。当飞行器的尺寸比较小时，后面一种情况通常是确实存在的。虽然系统的设计者也可能预料到不管飞行器的尺寸如何都会有空间不足的问题。共同的问题是早在设计计划初期足够准确地确定空间要求。当飞行器开始设计时，通常根据“先到的先招待”这一原则来分配许多装备品和电气布线的空间。因此，设计者必须尽可能早地和尽可能准确地估计空间和位置的要求。另外，他可能发现，最不希望的区域是唯一适用的。重要的是把设计者提出的空间要求进行“立桩分界”，画一张通常称为飞行器的“机上分布图”。这张飞行器的比例图表示出在所计划的位置上的每个主要设备项目，而且也指出电缆的线路、管道、液压管和类似的项目。

在隔开增压舱隔框上的“引线”连接器的位置，对电气系统的设计者来说是特别重要的，因为在这种隔框上可用的空间始终是非常宝贵的。很不幸，其他设计者往往认为电气设计者所要求的空间不是那么不可侵犯的，所谓其他设计者，即指已为其他系统提出实际的或想像的空间优先权的人们。莫视这种不成文的“竞赛规则”往往会导致严重的干扰问题，或者迫使布线路线进入实际上无法保持适当间隙的区域内。在这种情况下，犯错误的人通常所提出的谬论是“导线是可弯曲的，故可在任何地方布线”。每个有经验的电气安装者能列举出这种错误观点的好几个例子。这种实践的后果与技术规范的要求是有偏差的，而且如果采办机构不同意，可能导致合同价格下降而所作的保证破产。

当估计设备的空间要求时，电气工程师也一定要考虑可能增加的要求。例如，如果双发电机电源系统被设计成两台发电机独立地工作的或“隔离的”系统，万一在设计计划的后期并联系统可能变成必需的，则将希望为并联设备留出空间。如果要求改变的话，这一准备在以后的改变过程中将使工程时间和费用减到最小。但是，当未来的要求靠不住时，要避免不分青红皂白地预备附加空间。飞行器的详细技术规范通常还要求为附加的断路器、开关和继电器准备空间。也可能规定了为以后整个系统的安装准备空间。这里的问题是不仅要获得必要的空间，而且要防止此空间被其他系统侵占。从飞行器的大隔舱一直到包括系统中的最小的继电器接线盒或断路器接线板，无论那里空间都可能成问题，关于空间的准备“着眼于未来”这个观点都适用。

5. 环境因素

(1) 概述

本章的前一段把一般工业设计的原理与飞机和导弹制造业的设计原理作了比较。这种比较包括为每个相应的工业列出典型设计因素表，排列其重要性次序。作为设计考虑的工作环境，出现在两个表的对应端。飞机和导弹的设计原理与一般工业的设计原理比较起来，仅这个因素就造成了很多根本的差别。在工作、运输和贮藏的全部状态下，当考虑机载电气系统每个部件的环境时，要确定对系统功能的所有影响的确是一个复杂的问题。尽管如此，设计者还是必须知道设备要遇到的全部环境因素、参数极值和暴露的持续时间。在研究可能有的设备环境时电气设计者为了计算整个感兴趣的区域的数据，很大程度上要依靠气动力学家和热力学家的帮助。设备所处的整个环境将是各种自然或气候因素和可能是热、机械和化学引起的因素的综合（参考资料 2-5R~8R 包括的内容）。

(2) 气候因素

a. 温度：在适当的选择之后，保持部件在其设计温度极限范围之内是设计者碰到的最普通的环境问题之一。电气部件或装备品在任何瞬间某一点上的温度，是由于内部发热、周围的管道、设备和部件的加热和冷却效应、再加上起源于较远的热源，如飞行器的蒙皮和发动机的影响的综合结果。极冷和极热两者必然是有矛盾的。但是后者往往是最困难的问题。在飞行器飞行过程中当许多影响因素正在以不同速率改变温度时，要准确计算任何给定部件的温度极值是一件极复杂的工作。尽管如此，还必须确定足够准确的温度参数，以便使设计的部件和设备在预期的极限范围内正确地运行。为了简化规定的温度参数的问题，政府的技术规范规定了某些“标准”状态；这些“标准”状态在设备技术规范中可作为运行和试验状态的要求出现。对于旋转机械，工业界也已确定了绝缘材料的某些温度极限等级，同时这些等

级的名称也常常适用于整个装备品，例如电动机或发电机。温度范围很宽的导线根据技术规范使其标准化，因此常常不会仅仅由于温度而向导线提出特殊的要求。除了温度极值对部件和设备的明显影响之外，还存在不太明显的影响，它也可能立刻引起故障、对故障产生影响或缩短设备寿命。这些在 I，“系统要求”中的“设备的冷却要求、方法和问题”一节中作了详细的讨论。

b. 高度：极低的大气压或很宽的压力变化范围对电气系统的影响可粗略地分成三类：热、材料和机械上的影响。电气设计者可容易地理解在高空工作时减少气冷发电机额定功率的必要性，除非它是非常保守的额定功率。发电机的制造商，通过提供包括他的发电机的、带有说明数据的减少额定值曲线图来帮助工程师评价冷却问题。低气压的大部分影响不像热那样不言而喻，同时许多场合下不适于用数学公式来解决。高度对材料影响的一个例子是在 35,000 呎以上的高空碳刷迅速地磨损。在高空极低温度下碳刷极度干燥被认为是加速磨损的主要原因。由于碳刷材料中加进了添加剂以及整流子换向片铜合金成份的改变，这就使问题得到了满意的解决。但是，添加剂的影响是这样的，如果仅在低空使用可能是有害的。在原文第五章中进一步讨论碳刷问题的细节。高度对材料的其他影响是由于电晕造成的，这点电气设计者一定是了解的。电气工程师熟知高压输电线上的电晕现象。随着高度增加，出现电晕的电压值就减小；因此，机载电气系统中出现的正常电压瞬变现象可能足以在高性能飞机的高度范围内引起电晕。电晕本身并无害处，但是空气的电离可能导致汇流条、接头和触点间的电弧放电。它也可能导致绝缘局部击穿，而每次击穿又是逐渐发展的，一直到全部击穿为止。低气压、特别是压力极大变化的机械影响的例子是在不与大气相通的用密封垫密封的继电器盒和电气设备盒中引起的“抽气”现象。用这种型式的外壳，密封垫可起阀门的作用，只让内部压力逐渐的变化。处在极低的大气压的情况下，当飞机通过低空的较热而潮湿的空气降落时，设备盒会吸入空气，同时也可能吸入相当多的湿气。当然，“容器”中聚集了水将引起设备故障（在原文第五章中讨论了预防措施）。电气设计者对可能引起设备故障的那种组合状态必须给予特别注意。

c. 湿度：湿气对电气设备固有的功能是一个经常出现的威胁。你将发现，它以最曲折的路径和最异于寻常的方法侵入设备，前节中已指出这种例子。通常要求机载设备能在从数小时到数目的时间内处在 100% 的相对湿度下，并在这种情况下进行试验。由于模拟每种可能的安装状态和每种可能有的条件是极困难的，试验不完全是真实的。因此，设备和安装设计者从防止任何来源的湿气的影响的观点出发，统盘地分析设备的设计及其安装是非常重要的。在分析时，设计者可能提出（和回答）的一些问题是：

- (a) 如果不可能提供密封的容器，容器确实与大气相通，这样就不会吸入湿气吗？
- (b) 如果冷却空气用管道通到设备，水渗入冷却空气会引起故障吗？
- (c) 通风孔（当要求时）仅位于外壳的两侧和低部吗？
- (d) 避免使用吸收湿气的材料吗？
- (e) 连接器、接头和裸露的导体都能很好防止湿气吗？
- (f) 接到设备去的电缆带有防水环，这样水（和其他液体）就不能顺电缆进入设备吗？
- (g) 在设备安装中，设备所处的环境是否能确实得到保护？

显然，如果设计者是肯定地回答上述的问题，必须在设备的设计和安装方面特别谨慎。

d. 雨：水渗透对设备的影响类似于高相对湿度的影响，但是设备和电气安装的设计者

必须考虑到水通过冷却通风孔滴入或溅进设备的可能性。在所有不密封的设备盒中要求排水孔，以免在设备中聚集水。

e. 霉菌：在热带与湿度有密切关系的问题是在导线和设备上，特别是在一些绝缘材料上，生霉的问题。当被霉菌腐蚀时绝缘效果就显著地减小，在严重的情况下可能完全失效。电气设备的设计者应该断定试用的绝缘材料是否适应霉菌的滋长；如果是的话，就要避免使用这些材料。从霉菌生长的观点出发，凡是在不可避免地要使用一些靠不住的材料的材料的地方一定要对材料进行防菌涂层的处理。在军用技术规范中叙述了霉菌生长的标准试验。试验要求相当长的时间，因为规定得放在某些指定种类的霉菌孢子中一个月左右。

f. 盐雾：当然，设计海军的设备必须经得起在海上环境中遇到的恶劣条件。或许电气设备在这种环境中坏的情况是暴露在盐雾中。在设计时不仅应特别注意防止盐雾进入设备，而且在选择材料和表面处理时也要给予特别注意。某些材料，如镁，本来就是易受到盐雾严重腐蚀的。海上的环境也加剧了紧密接触的不同金属之间的电解作用，如铜和铝。恰当的实例是镁质壳体上附着钢质铭牌的航空发电机。钢和镁的组合体处在盐份很浓的湿气中会引起发电机壳体和铭牌严重的腐蚀。为了改变这种情况必须把绝缘漆涂在铭牌的下侧和边缘。暴露在盐雾中是为海军设备确定的一种标准试验状态（参考资料 2-5R、2-6R、2-9R）。

g. 砂尘：几乎在所有的工业中砂尘污染设备是电气设计者面临的最普通的问题。它对海军飞机和导弹设备的设计者仍旧是一个问题，因为这种设备不但在通常的海上环境中而且在沙漠环境中都必须可靠地工作。可以用紧密配合的防尘外壳、密封或部件封装的方法来防止砂尘。像液体一样，砂尘可以寻找最曲折的路径进入设备。如果由于通风或其他原因要开一个孔，设计者一定要考虑砂尘对内部部件的影响，并提供如可能指出的那种附加保护。

h. 日光：军用技术规范要求把由于长期暴露在阳光下而可能故障或引起故障的设备和部件设计成能抵抗这种曝晒的影响。在这类中，电气设计者所关心的典型项目是边缘照明的控制和铭牌。为作标记而使用适当的材料，在这里要给予特别注意（参考资料 2-10R、2-11R）。

(3) 机械因素

在上述的讨论之前，已指出除气候因素之外，把其他因素分成机械的和化学的，以有助于决定机载设备的整个环境。机械因素包括：

a. 振动：航空飞行器的性能每向前一步，振动问题就增加不少。喷气发动机的出现导致振动频率的范围达到并超过 2,000 赫，以代替普通用活塞式发动机的航空飞行器的低而窄的 5~500 赫的频带。振动对电气设备的影响是：触点损坏（断续工作、焊接等），旋转设备上碳刷跳动引起整流子产生强烈的电弧甚至烧坏，折断引线，焊接接点断开，接线柱松动，以及由于设备支架，特别是变压器底座的弯曲和疲劳引起的结构损坏。振动频率范围宽就增加了零件或导线以自然或谐振频率振动的可能性，其如果使零件损坏、电路故障。企图在飞行器的整个工作范围内计算所有振动对装备品的合成影响，那是不可能的。因此，要求设备的设计者和系统安装设计者在应用通过研究、体验和试验获得的设计技术方面发挥最大的创造性，以弥补振动的影响。一般说来，被安装的零件和设备，其重心要尽可能地接近底座或结构，并牢牢地固定它们；导线和引线必须以准确的间隔固定之；悬臂式支架一定要避免，而且全部支承受架和结构必须是紧固的。设备的振动试验应表明能具有多大经受飞行器振动环境的能力。但必须记住，只有当试验条件模拟了实际安装状态时，试验结果才是可靠

的。试验可指出需要隔振器，隔振器经常用在设备的安装中，以防止飞行器结构向设备传递振动或减少这种振动的容许极限。当使用隔振器时，系统工程师一定要彻底搞清楚隔振器是适当的。为了消除因振动而损坏系统的现象，还要做大量的工作，这些技术在原文第六章中进一步详细地讨论。

b. 高强度声：由于它的影响有些类似于通过结构传播的振动的影晌，故以这种观点讨论这个因素。它是要求作为设计中一个因素来考虑的比较新的问题，在火箭发动机和特别高性能的喷气发动机中已经出现了这问题。其强度足够引起损坏设备和伤害人身的高强度声（100~150 分贝）可能直接地由发动机产生的，也可能由于气动力紊流的结果而间接地由飞行器的蒙皮和结构产生。研究已经表明，产生声能的大小与发动机的耗油率和推力有一个确定的关系。正如上述所指出的，声能可直接或间接地传递。直接通过空气把声能传递到飞行器的设备、结构和蒙皮。结构和蒙皮的振动又重新把能量传播到不直接受声音影响的其他设备。虽然，声音可能以某一强度先在一窄频带上产生，但传到设备的合成噪音可能在宽频率范围内有随机特性。除了上面已讨论的对电气设备的振动影响外，声能可能使电气设备产生足以引起误动作的假电信号。对人的危害也一定不能忽视。很明显，噪音问题不完全适用于数学分析，但是研究和试验已确定了一些有助于设计者的准则和经验公式。例如，从给定喷气发动机的已知特性，就有可能依据总的声功率级（以瓦表示）和总的声压级（以达因/厘米²表示）计算声的环境。这样就可以预测飞机各个区域的声压级。当内部区域内预计超过 120 分贝的能级时，涉及位于该区域的设备的技术规范将包括在某适用的声环境中试验的要求。试验设备和混响室对这种试验是适合的。为在严重的声环境中保证设备比较可靠地工作而采用的设计或改型方法，与在设计中解决非常严重的振动所使用的方法相同（参考材料 2-12R~15R 所包括的内容）。

c. 冲击和加速度：这两个因素对部件和设备有着相同的破坏影响。由于设备设计和安装的不合理而产生的共同影响是使零件变形、位移或破裂，折断引线，以及使继电器的连接中断和发生故障。电气设备对这些方面的损坏是特别敏感的，故所设计和安装的电气设备一定要经得起在使用中所遇到的冲击、加速度和减速度而不损坏或引起故障。在海军飞机中，最常见的严重冲击出现于在航空母舰甲板上弹射起飞和制动着陆时。导弹设备可能在运输中受到严重的冲击，以及在发射时受到剧烈的加速。为保护设备而使用的设计 and 安装技术与防止振动所使用的技术相同。军用技术规范叙述了设备冲击试验的标准试验（参考资料 2-5R）。

(4) 化学和核因素

要求由机载设备设计者考虑的第三类一般的环境因素包括：

a. 有害气体：航空飞行器中的设备和人可能处在种类繁多的气体中，它们中的一些，如氧气，在一定的地方和一定的浓度之下不仅无害，而且是十分必须的。同样这些“无害的”气体在不恰当的地方和过浓的浓度下可能带来不幸的结果。电气设计者一定要经常地提防电火花和爆炸性气体在一起产生危险和破坏的可能性。凡是在存在爆炸危险的区域安装设备得根据防爆的军用技术规范进行。其要求是两方面的，即设备不应引起爆炸，并且当外部爆炸时它不会破碎。后一要求的目的是要减少爆炸的危险和破坏的影响。设备和安装的设计者应给予考虑的一些气体是：浓缩的氧和氢、蓄电池气体、燃油蒸气和臭氧。

b. 有害的液体：像上面讨论的气体一样，在航空飞行器中使用的很多液体只有当它们

在指定的路线之外时才有害。电气设计者所采用的预防措施大部分与防止爆炸气体使用的那些措施相同。主要是设备的设计和安装一定要使液体不能滴入设备而引起腐蚀或变成爆炸蒸气。可能引起设备故障的一些液体（除水外）是：燃油、液压介质、发动机滑油和液态去污剂（后者不在飞机内使用，但偶然在正常地洗刷飞机时进入内部）。

c. 辐射：如果飞行器装有大功率雷达，如果在机上带有核材料或者如果飞行器（像导弹）在极高的高空飞行，则飞行器设备可能受到辐射影响。因此，必须要考虑这些影响：

(a) 电磁辐射：它包括红外线、紫外线、 x 射线和 γ 射线。

(b) 高能粒子辐射：它包括 β 射线、质子、 α 射线和中子。

在原文第八章中讨论了辐射对人的影响。在这一点上，防止辐射的影响的设计技术和材料是主要关心的问题。关于辐射对材料分成的详细影响到目前为止还知道得不多；但知道，一些介质的性能可能得到改进，而另一些介质的性能严重的变坏。当出现这种情况时，电气设计者在他的技术规范中应禁止使用由于辐射而损坏的介电材料（参考资料 2-16R、2-17R）。

6. 可靠性

可靠性就是装置或系统在规定的时期内不损坏，在给定的工作和环境状态下起到预定作用的可能性。可靠性这个定义的推论是“如果能够减少装置损坏的可能性，将会增加装置的可靠性”。解决可靠性问题的整个方法可用下列的问题来叙述：“要采取什么样的行动，才确实使装置损坏的可能性减到实际最小的程度？”可靠性的万灵药是不存在的，仅有良好的设计或质量控制还不能保证可靠性最佳。只有好的制造程序、维护或测试方法也不能保证可靠性最佳。所有这些因素，除了诸如采办、装卸和运输等其他因素外，为了保证可靠性最佳还必须联合考虑所有因素。下面列出的影响可靠性的部分因素被认为是有着同等的重要性。未能适当的注意其中的任何一项，将在使用中对最终产品的可靠性带来不良的影响。

a. 可靠性的设计：降低零件的额定值，即以低于全部潜力使用零件，而获得更高的可靠性。使用可靠性已知的预先检验过的零件，如同使部件有余度一样是一种好方法（见原文第八章）。

b. 试验：可靠性试验是用来证明已经满足预定的固有可靠性。如果试验未能作出证实，必须指出设计的缺陷，以表明有修正的必要。另外，可靠性试验不涉及制造的偏差和/或质量控制不适当的问题。

c. 质量控制：必须运用质量控制方法，以确保维持部件或系统固有的可靠性。对要求消除早期故障的那些项目，质量控制一定要考虑消除早期故障的时间。所谓消除早期故障即使部件或系统在规定的时间内运行以消除预料的早期故障。凡是适用采办的技术规范的地方，一定包括试验和消除早期故障的要求。

d. 故障报告：必须使用综合的故障报告系统。当一发生故障后就必须尽可能地立即记录确实的故障数据，同时必须判断起因和影响。修正动作和反复检查或维护是很重要的。

7. 安全

对于武器系统所有电路和部件的电气安装，主要的要求之一就是安全。为了达到最大的安全度，为在切实可行的范围内减少可能的危险，对设计必须给予仔细的考虑。

能确保武器系统有最大程度的安全而不带来一点不利的设计原理是很难制订的。而安全决不能损害武器系统的任务使问题进一步复杂化。理论上，百分之百安全的电气系统或许是能够设计和生产的。但它可能太重，使性能下降，复杂得使之难以维护，成本高得不准采办。但是，至少飞机电气系统的两个分系统必须是百分之百的安全。这就是重要汇流条系统和武器系统。这个要求的原因是十分明显的。

电气设计者一定要特别地提防可能导致着火、爆炸或电击的那些有问题的电路和条件。由通常包括在电源系统设计中的“系统保护装置”提供高度的把握，以防止许多危险情况。这种保护由断路器、保险丝、限制器和感受电路来实现，这些设备用来断开电源或隔离故障（短路、接地电路等），以及防止电源系统反常地运行。这种型式的系统保护在下面“系统最佳设计”一节中作更详细的讨论。由于这个题目很重要，电气设计的安全问题在原文第八章中作相当详细的讨论。

8. 成本

武器系统的成本控制是必要的，这是与军事部门有深远联系的问题。当了解到许多因素对提高现代武器系统的价格产生比较大的影响时，基本设计被认为是最重要的成本因素。电气设计者必须经常地了解设计中的一些成本因素。不希望电气设计者背着成本的包袱而对产品的质量和/或可靠性产生不利的影响。但是，在所建议的系统方案中必须要考虑成本、复杂程度、技术发展状态的进步情况和采用先进技术的程度。必须选择与总设计方案，当然也包括成本，相一致的基本设计方案。当合理的设计方案已被确定，就存在着在基本设计进行过程中要求考虑的若干成本因素。为了在容许的经费范围内提出适当的设计，必须考虑下述各项：

- a. 最终产品的型式和复杂性。
- b. 要求的迫切性。
- c. 完成的时间。
- d. 公司技术规范的使用价值。
- e. 建议设计的稳定性/不稳定性。
- f. 比较设计的使用价值。
- g. 与现有设备要求的一致性。
- h. 技术能力。

在确定系统设计时必须考虑的重要费用类别包括：

a. 设计：本类包括科学和工程部门与要求提供生产设计有关的研究成果和研究工作的费用。此成果的范围包括了全部技术和成本考虑的综合结果，并在系统的制造和使用的整个过程中成为系统以后全部费用的基础。

b. 试验：试验的范围以及与检验零件、部件和分系统有关的费用是一个重要的成本因素。本类包括研制成品、实验室设备、辅助劳动和设计特有的任何特殊试验设备的费用。由于选择在以前已经取得应用资格的现成的部件或设备，有时能显著地减少这一部分的费用。选择经过鉴定的零件不仅减少了试验费用，而且也大大减少了以后的制造和后勤费用。凡是在必须进行试验的地方必须认真地制订试验计划，以提供合适的鉴定和防止重复。必须以如果出现故障便在计划进度表内能完成早期的修正动作的方式制订试验计划。这将保证延期或

翻新所增加的费用最小。

c. 制造：设计指出了完成生产所要求的制造技术和工业设备。工程师还必须考虑要求的制造能力以及它对计划成本产生的影响。如果设计要求新的或先进的制造方法，成本将成比例地地加。

d. 系统辅助设备：当设计系统时，本因素必须是在基本的考虑因素之中。对于复杂的“新方案”的系统设计，就需要特殊的辅助设备和/或测试设备。充分的预见常能限制这些设备的费用范围。使用标准型式的测试和辅助设备的可能性必须作为设计的考虑因素。自动测试或自行夹持的部件也可能有助于成本的降低。

e. 训练：系统设计规定了用于人员训练、模拟训练装置和训练设备的费用范围。通过初步设计阶段的合理考虑，这些费用能调整到可估价的范围内。训练费用的一部分可归结于下面所述的系统可维护性。

f. 可维护性：本项指系统的设计特性，它确定了使系统保持战斗准备所需的相对的人力、时间、设备和费用。这个因素像可靠性一样，已变得格外重要了，很遗憾，到目前为止还不能用数字来表示它，因此通常不得不参照比较项目。在系统最初方案的初期，为得到好的可维护性而进行的计划和设计把成本保持在可接受的水平下是必要的。事实上，从可维护性的观点看来，好的设计通过减少承包商的论证和试验计划，可以导致最终产品的整个费用较低。下面“运行费用”一项讨论了良好可维护性的另一费用上的优点。

g. 易损坏性：随着机上设备和电气布线数量的增加，为了最大限度地减少会使飞机变成无效武器的战斗损坏，设计安装就变得更加困难起来。但是，由于在设计初期对关键性布线的线路，如电源馈电线、武器系统的互连和连接重要汇流条的布线等问题作了适当考虑，能够降低易损坏性而不使成本显著地增加。在战斗机中，关键性的布线多重安装可能是正确的，为了降低易损坏性而增加成本被认为是一种折衷的办法。

h. 使用期限：本项定义为消除早期故障和用坏之间的总工作时间(参考资料 2-18R)。从后勤和可维护性的观点看来，希望系统设备的使用期限与飞行器的相等。然而，系统工程师必须考虑诸如重量、尺寸等其他更为重要的因素。初始成本也是一个因素，但其他因素相等，当考虑到“换装”费用时在长期运行的情况下采用具有长寿命和较高初始成本的设备可能是最经济的。

i. 运行费用：当运用好的设计实践和正确地考虑技术规范后，就不大可能使电气系统的运行费用不合理。决定运行费用的主要因素是系统的可维护性。因此，满足技术规范要求并作最佳可维护性设计的系统，从运行费用的观点来看几乎必然是可接受的。对上述每一类中所有成本因素的研究可能包括在诸如下面叙述的“经济方法研究”一节的精巧(但有效的)技术应用中。

9. 经济方法研究

为了降低产品的成本，在设计和制造过程中航空飞行器的制造商可能更重视成本降低技术的应用。有时适用于这种活动方面的术语是“经济方法研究”和“价值分析”。一般说这两个术语都能定义为以最低限度的价格和足够的重量和可靠性去达到所要求的作用的一种方法。然而这两个术语存在着明显的和重要的差别。经济方法研究可被叙述为“事先”的活动，因为在制造产品之前采用了降低成本的方法。价值分析的过程是一种“事后”的活动，因为

在制造后以这种方法严密地检查生产以便有可能降低成本。显而易见，采用了经济方法研究的方法将不需要第二种方法。但是，这两种方法的存在还是有一些原因的。一方面是时间的因素，在设计中时间因素往往强烈地影响某些材料的选择，而成本的作用次于可用性和权宜之计；另一方面的重要原因是：到制造产品的时候，关于应用，特别是关于环境的细节，已知道得很多了，因此常常能可靠地实现降低成本的设计改变。设计工程师在设计程序中发展和使用经济方法研究的方法是重要的。简单说来，这些方法中的一些是：

- a. 简化设计；
- b. 对适用的零件最大限度地使用标准件；
- c. 最小限度地采用严格的容限；
- d. 凡是适当之处使用低成本的材料；
- e. 简化制造。

上述项目决不是表示经济方法研究技术的范围。这里介绍的是要使工程师注意的经济方法研究技术的一小部分，而这一小部分正在初期设计中和作为设计审查方法用时，显得更加重要。在原文附录 I 中详细地讨论这个问题。

10. 工程标准

每一个工程师都认为标准是工程界的一个重要的“工具”。像任何工具一样对设计者而言，使用合宜时它是一种财富，但盲目的使用时只能是一种义务。它不会限制工程师的创造性，事实上还能用来增加创造性。在企图生产先进的产品时，有些设计者有着重视他们自己创造的新设计而轻视现有标准的倾向。当不经充分地考虑就漠视标准时，其结果可能是一个高度先进的系统或飞行器；但也是一个成本极高，制造、维护和操作很困难的系统或飞行器。另一方面，不正确的检验和应用标准可能严重地损害设计。只有在作仔细的、没有偏见的深思熟虑之后，才能决定使用或不使用一个标准。在详细的技术规范中将谈到所有承包商的技术规范，而承包商的这些技术规范要听候采办机构的批准。虽然标准是不断随着要求的改变以及新技术的发展而发展的，但标准的确定也还是有落后于要求和使用的趋势。由于这个原因，当很先进的、高性能和重量最小的飞行器的研制是特别重要时，必须极细心地检查使用的每一个标准。

标准的一般类别包括：

- a. 材料；
- b. 工艺规范；
- c. 设计实践；
- d. 技术规范；
- e. 术语表；
- f. 设备和部件。

正确地应用标准可以得到很多优点，其中有：

- a. 简化了交流、设计、制造、采办和供应；
- b. 降低了成本；
- c. 增加了可靠性；
- d. 有助于生产；

e. 减少了从设计方案到可接收的最终产品的交付的时间间隔，有时能减少很多时间。

制造商编的标准是给他们的公司用的；协会编的标准是给他们的成员用的；而政府编的标准是给它的供给商用的。国家承认了许多标准化的物体。在选择标准时，设计者必须弄明白所选择的标准是否满足他的技术要求，并已为用户和工业界所接受。凡是适用多种选择的地方，为了帮助设计者选择标准，有一份政府的技术规范（参考资料 2-19R）确定了优先选择的次序。简单说来，这个次序是：

a. 完全对口的政府技术规范（联邦的和军用的）和标准（MIL-STD 和 MS）。

b. 部分对口的政府技术规范 and 标准。

c. 以前批准的、给政府合同使用的、完全对口的工业技术规范 and 标准（ASTM——美国材料试验学会、AMS——航空材料技术规范，ANS——国家航宇标准）。

d. 给政府使用的、没有预先列出的工业技术规范 and 标准（需要由采办机构批准）。

e. 公司技术规范 and 标准（要求由采办机构批准，同时这个批准仅适用于分包商）。

很多工程组织包括一个作为辅助性的为设计工程师服务的标准组。设计工程师要很好地成为全面了解他的组织提供的标准业务，并利用它。

11. 设计时间

不大注意其努力范围的设计工程师有把计划表看作是一难免的、不愉快的弊病的倾向。有时为了节省时间，紧迫的计划进度苛刻地要求高价格。而这些常常导致更高的成本和折衷的设计方案，因而也只能得到一次于最佳系统和飞行器的系统和飞行器。设计工程师常常容易感到，他努力的结果不能反映出如果用更长的时间他能够完成的结果。不管反对紧迫计划进度的所有这些意见显然是很好的，有关完美的武器仍然在制图板上而不够完美的武器却在手头的这种意见，由于采办机构的要求而成为主要的。

几乎没有什么工业像飞机和导弹工业中那样，计划进度有着强烈的刺激作用。这是有其原因的。首先是有着现在被淘汰的问题。被淘汰对航空飞行器的制造者和他的用户来说是大祸临头。防止或至少延迟大祸降临的一个流行的方法就是要加速从建议的准备直到设计、制造、飞行试验和交货的飞行器的采办过程。计划进度紧迫的第二个原因必然与采办机构在接受和部署新的飞机和导弹方面必须作广泛的准备有关。大约在合同订立的时候，精心制成的、影响深远的活动是由军事部门为准备新的或增添的装备以及所需的辅助设备而着手的活动。因此，任何显著延误飞机或导弹的交货的影响是显而易见的。设计者要学会同紧迫的预定计划共处，并用以下方法最终轻易解决之：

a. 在开始设计之前，弄清预料到的设计问题，这样能赢得时间，计划解决的方法。

b. 订周密的工作计划。

c. 发扬果断的技巧——坚持把事做完。

d. 研究管理部门的计划进度，并为完成计划而提供仔细考虑的预定计划数据。

二、系统最佳设计

1. 概述

军用技术规范和军用标准确定了电源系统、电气设备和机上用电设备的基本型式和至少应具有的特征。由技术规范所规定的极限是考虑到后勤、经济性以及机载电气系统和用电设备间一致性方面而定的。因此，系统工程师一般很少选择系统的额定参数。但是，他却要选择规定的最大极限范围内的容差，并且必须仔细确定每个特性的容差。这些特性的定义和其他详细的资料包括在参考资料 2-20R~2-23R 中。最佳设计有时使用的工程技术是正式“设计审查”。设计审查的程序是设计者完成本身的审查后，把其设计交给设计审查委员会或专家小组以便根据上述讨论的基本因素进行分析研究。然后，将分析资料连同对设计者考虑所提出的建议交给设计者。凡是沒有确定正式审查程序的地方，设计者对本身工作进行类似的分析是有益的。

2. 系统的最佳控制

在设计中，各种电气系统的控制功能必须满足各个系统和安装这些系统的飞行器的要求。根据系统的要求，控制功能可能是简单的，如小容量的单发电机直流系统；或者，控制功能可能是复杂的，如大容量的多发电机交流系统。为了便于讨论起见，控制功能通常分成下述三组：

- (a) 系统功能控制；
- (b) 正常运行参数控制；
- (c) 系统保护。

设计中采用的原理和被控制的主要特性的典型参数，包括在下面讨论中。各种控制方法及有关控制功能更完整的细节、包括在原文第三、四、五章中。某些基本规则的应用将有助于设计者完成控制和保护功能的最佳选择和设计。这些基本规则是：

a. 保持功能安全：控制功能的安全问题应在整个设计中给予考虑，同时，对下列任何一个要求，都不能牺牲控制功能的安全。

b. 保持功能简单：电气系统设计者必须认真地使用这条规则，因为对手动控制设备影响很大的工程心里学专家，也希望使用同样的规则。使空勤人员用的控制设备简单，必然会增加电气系统的复杂性。设计者一定要避免用不必要的控制和保护电路去装饰系统。采用每种功能应立足于功能本身的价值如何。

c. 使功能可靠：“保持功能简单”也有助于提高电路的可靠性。因为保护和控制电路极为重要，为了防止电路故障，必须极度地注意这些电路设计和安装的每个问题。

d. 使功能一致：精确的计时和调整是很多保护电路的基本要求。在可能含有计时功能的地方，为保证正确的动作顺序，应极度地注意分析。断路器、保险丝和限制器这类设备的动作中含有计时功能时，应对这些设备运行所处的所有温度条件和加载条件作严格检查。

e. 使功能“防反馈”：由于潜泄电流通过一些意外的路径进入电路，灵敏继电器便可能产生故障。往往被人们忽略的这种电流源出现于在某些接有高速、大惯性电动机的电路