

飞机航炮与支承结构的匹配 要求及其设计途径

沈阳飞机公司设计部 何连珠 赵沛霖

摘 要

在飞机结构动力设计中,航炮与其支承结构的匹配关系是关系着结构设计成败的极重要的问题之一。

通过对地面上支承航炮的板簧系统、对供地面试验用的模型结构及对实际结构的响应计算,可求出航炮与其支承结构相匹配的设计曲线。本文给出了一组可供实际使用的匹配曲线。再利用冲击载荷谱图作为实现匹配设计的技术途径,以期实现最佳的结构设计,从而进一步完善了动力强度设计程序。

一、序 言

航炮在飞机上的安装,一般要通过支承航炮的过渡件与主承力结构相连接来实现。航炮发射时对结构引起的响应值与支承航炮的过渡件有十分密切的关系。两者匹配得当就可以控制其响应值,否则其响应值会增大甚至导致结构破损。

本文利用能量原理通过一系列的响应计算,求出了航炮与其支承系统的匹配关系曲线。这是一条不同于一般共振曲线的多峰值曲线,只要使结构设计的匹配关系不落在相应的峰值上,就可有效地控制其响应值。

作为实现这种匹配设计的技术途径,文中提出了利用冲击响应谱理论来控制其连续动载的响应值,以期实现最佳设计的要求。

二、航炮单射与连射的响应计算

我们把航炮与支承航炮的过渡件视为振源系统,而把支持该振源系统的主承力结构视为负载系统,然后将此“振源-负载系统”统一视为整体计算对象进行有限元分析。

分析计算是分别对板簧系统、模型结构和实际结构进行的。板簧系统是炮厂地面打炮时的支承系统,模型结构是装机前的地面打炮试验的支承系统。这两者的计算模型比较简单,可以按实际情况全部计入。而实际结构十分复杂,计算时对振源系统易于处理,承载系统以主交点起前后各取十个框距从结构中切出。切出的部位以弹簧元素连接,

1983年12月20日收到。

而有效区各向内缩进一个框距。按单发射和连发射受载情况分别计算其响应值。

1. 单射时的响应情况

航炮单发射时相当于给承载系统加以单冲击情况。系统在冲击激励作用下的响应与冲击载荷的类型、冲击持续时间 D 及该系统的固有周期 T 都有直接关系。

通过对计算系统施加半正弦形、三角形、矩形、锯齿形及 $(1 - \cos t)$ 形脉冲激励,用振型叠加法求出系统的响应值。通过比较这些响应值可见,在相同的冲击脉宽和冲击峰值的情况下,它们响应值之比即为这些冲击波形下所含面积之比^[1,5]。所以我们可把复杂的载荷时间历程化为具有相同波形下面积的规范化载荷形式。即把保持相同冲击能量的规范化载荷作为今后响应计算的使用载荷。

2. 连射时的响应情况

将单发载荷曲线进行规范化处理,然后按机炮发射速率连续加到承载系统上,就可求到连射时的响应值。所求的响应值明显地反应出载荷特性和系统特性。

下面给出某机炮在主承力结构上的二十连发射击的响应情况。图1所示为主承力梁中响应内力的时间历程。图中既反应出各发的响应峰值,又反应出结构的高频效应。

进一步观察图1可见,各发峰值内力也是变化的,这正是我们关心的问题。在同一载荷作用下,对于不同参数的承力结构系统,这些峰值内力的变化是不同的。二十连发的峰值弯矩和轴力集中表示在图2中。图中所示为航炮主交点处的内力变化包线,这些峰值也在周期性地变化着^[2]。包线的最大值是受所设计的承载系统的匹配程度控制的。本文的目的就是控制该值保持最低量值。

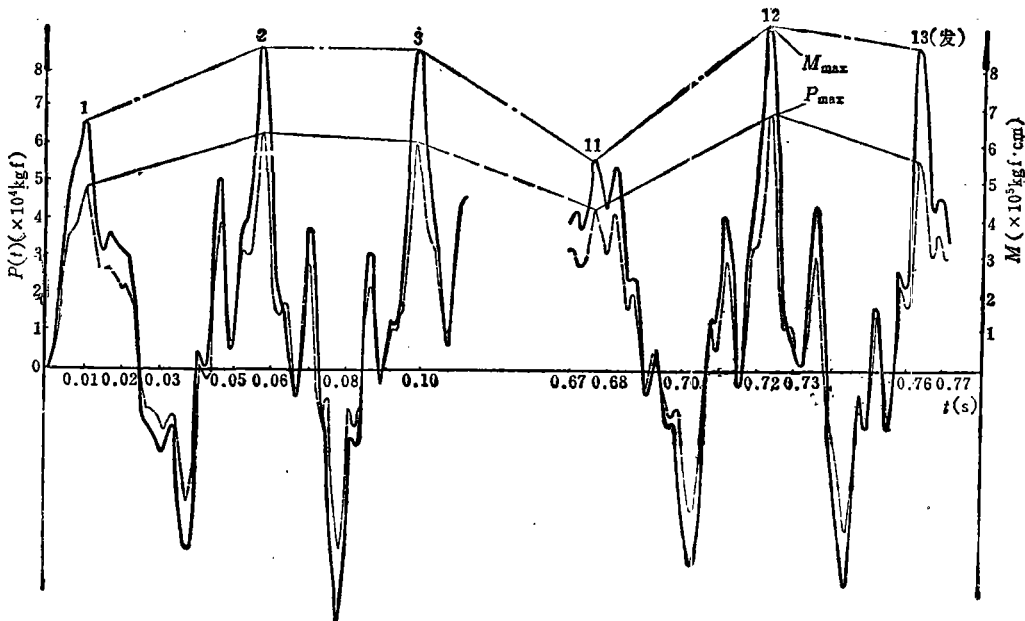


图1 二十连发承力梁中的响应历程(局部)

Fig.1 Response history (local) of the Supporting beam during 20 times continual launch

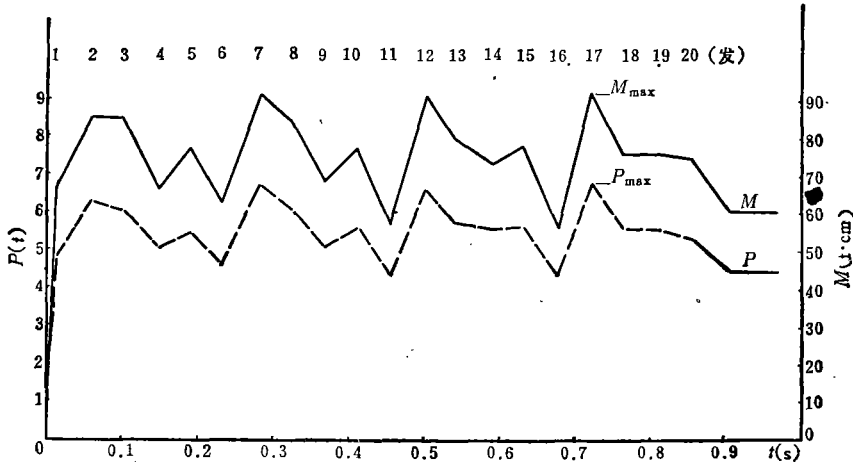


图 2 二十连发承载力梁峰值内力包线

Fig.2 Envelope of peak internal forces of the Supporting beam during 20 times continual launch

三、匹配设计曲线

对于板簧系统，我们曾用能量关系解释了附加配重可降低响应值的原理，给出了一条单自由度系统可用的匹配关系曲线^[3]，这与美国洛克希德飞机公司的动力设计曲线是一致的^[4]。对于模型结构系统，通过改变一系列的结构性动力特性，求出各响应值，也得出一条多自由度系统可用的匹配关系曲线^[5]。对于实际结构系统，通过改变振源系统中的过渡件的动态特性，就可得到结构设计中可用的匹配曲线。

取计算系统的一阶固有频率来表征系统的刚度特性，计算了特征频率从18.36Hz 到

表 1 变刚度响应值

Table 1 The responses changed stiffness

计算情况	一阶频率 (Hz)	当量刚度 \bar{K} (kgf/cm)	总后座力 (kgf)	爪 I 力 (kgf)	爪 II 力 (kgf)	爪 III 力 (kgf)	放大系数 β
1	18.35	576.1	12096	6417	4761	918	1.521
2	22.80	891.3	14087	7662	5046	1379	1.761
3	27.40	1287.3	15633	8000	5313	2320	1.594
4	32.44	1804.4	23672	10320	10327	3025	2.959
5	36.74	2314.4	11920	6286	4541	1093	1.490
6	37.05	2353.6	11734	5608	4852	1274	1.466
7	37.70	2436.9	11623	5391	4803	1429	1.453
8	55.08	5201.7	9656	4107	4140	1409	1.207
9	66.86	7664.7	8653	3653	3716	1284	1.082
10	76.83	10121	14756	6825	6243	1688	1.844
11	85.10	12417	20099	9073	8639	2387	2.512
12	130.1	28976	11489	5983	4123	1383	1.436
13	160.1	43894	7222	2724	3492	1006	0.903
14	197.0	66542	8900	3702	3908	1290	1.113
15	213.0	77789	9074	3638	4047	1389	1.134
16	249.0	106306	11714	4225	5855	1634	1.464

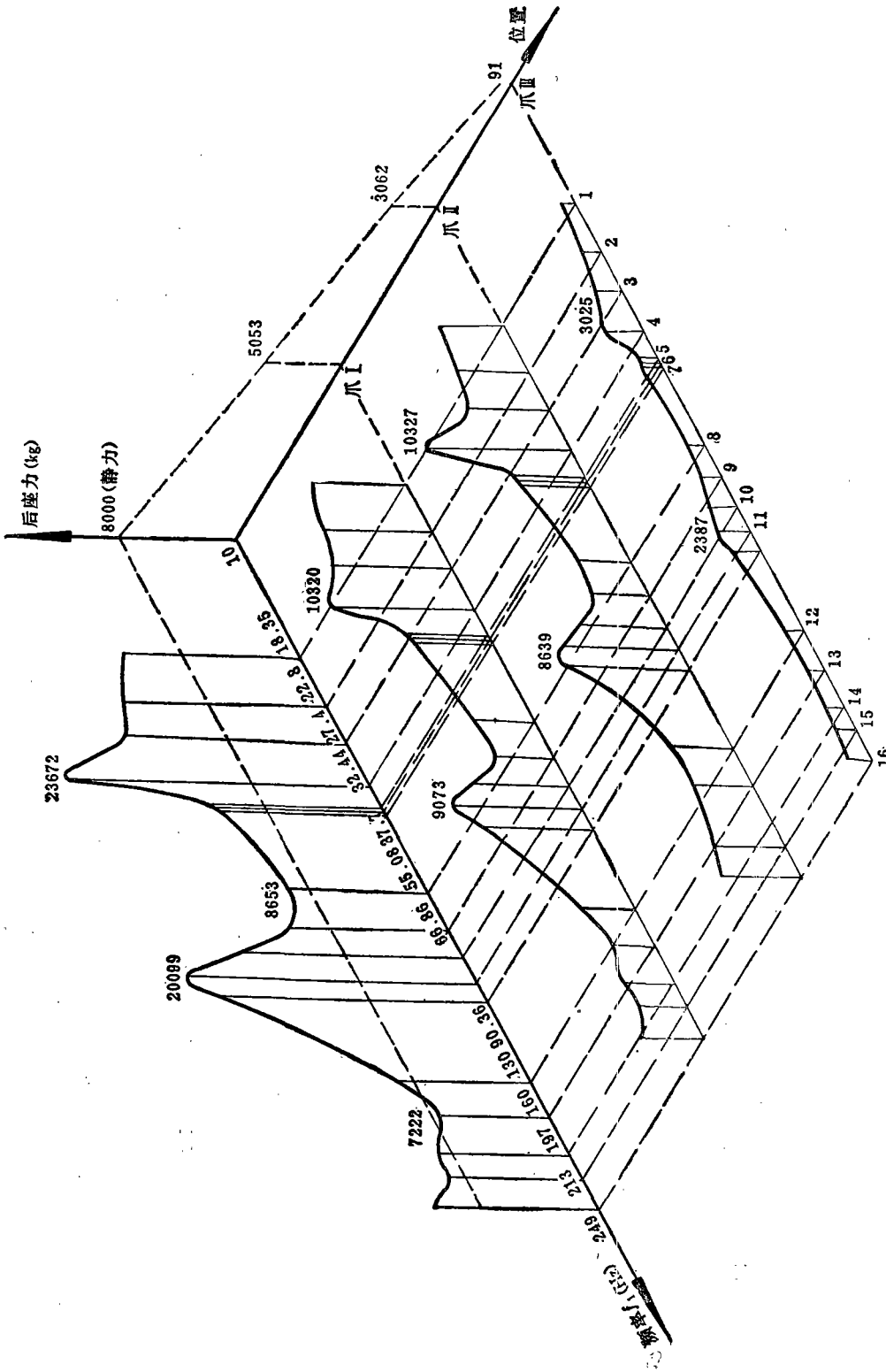


图 3 后座力响应曲线 (匹配曲线)

Fig. 3 Behind acting force responses (matching curves)

249Hz的十六种情况。其响应的最大值也就是最大的后座力值,即为图 2 包线的最大值。

把响应的最大值及其在过渡件上的分配情况集中列于表 1 中。表中的当量刚度 \bar{K} 是假定航炮总质量 M 集中置于主交点, 用其一阶频率 f_1 表达的刚度值

$$\bar{K} = 4\pi^2 f_1^2 \cdot M$$

放大系数 β 是总后座力与静力载荷 8000kg 之比。由表中的放大系数值可见, 在表征频率为 32.44Hz 和 85.10Hz 这两个频率上, 其响应值达到峰值。如果所设计的结构系统的低频在此频率附近, 则后座力就比静载荷大了 2.5~3.0 倍。这就极容易导致结构破损。所以结构系统必须躲开这两个频率区。

将表 1 中的总后座力与各分力随着系统一阶频率的变化情况画于图 3 中, 就得到后座力响应值随系统刚度变化的匹配曲线。这一曲线表明:

(1) 设计机炮承载结构系统时, 除满足正常的静强度要求外, 还应有一个刚度目标, 即承载系统的动态特性要满足响应力极小值条件。

(2) 刚度目标, 理论计算上可有若干个值, 但考虑到还要同时满足其他要求, 如射击指标等, 此刚度目标就大受限制, 实际可供选择的仅有 2~3 个。

(3) 某航炮按 14000kgf/cm 板簧刚度进行设计并提供装机使用。这一指标正处于计算系统的情况 11 附近, 正是在峰值响应区附近。所以在地面板簧上连续射击时可行的炮, 安装到这种结构上响应后座力显著增大, 甚至导致结构的破坏。

(4) 要综合考虑刚度要求, 争取匹配到响应低值区。对本系统要争取设计到一阶频率为 66.86Hz 或 160Hz 区域。

四、匹配设计的技术途径

必须看到, 上述匹配曲线的峰值, 既不是系统的高频响应, 也不是系统基频的倍频响应。对不同的结构系统, 其曲线的细节不尽相同, 但形式是不变的。对设计者来说, 总是存在着可供选择的响应谷值区域, 以实现其最佳的匹配设计。

根据炮击载荷的冲击特性及冲击载荷响应谱中的残余谱特性^[9], 对比正弦形脉冲与其他形式脉冲的残余响应谱图可见: 在承载系统固有频率 f 乘以冲击脉宽 D 的广义频率 fD 的中频段, 其响应值波动很大, 残余谱间断地出现零值和峰值, 如图 4 所示。

当把航炮射击时的载荷简化为规范化的脉冲载荷后, 就可利用残余谱的这个特性, 使连续冲击的后一个脉冲在前一个脉冲的残余值为最小时出现, 这样就有效地控制系统的响应值。参见图 4 的中部可见, 残余响应的最大值 v_R 与所施加脉冲激励的峰值 ξ_P 之比 v_R/ξ_P , 在广义频率 $2fD$ 等于 1、2.5、3.5 等值时出现峰值; 而在 $2fD$ 等于 2、3、4 等值时出现谷值。所以设计在这附近的结构系统既要争取落入到该残余响应的谷值区, 又要同时避开残余响应的峰值区。

为更有效地控制响应后座力, 除系统的一阶频率外, 二阶、三阶频率也要尽量满足残余响应的低值要求。如前计算, 当最低的前二阶频率 $2fD$ 都落到残余谱的谷值时, 就得到最佳的设计情况之一。如表 2 所示。

表 2 中的脉冲为正弦形的, 其半正弦脉宽 D 即为发射一发炮弹周期的一半, 本计算情况为 0.0222 秒。总观图 4 和表 2 可见:

(1) 按静力强度与刚度一般要求设计的结构系统, 倘若其广义频率很低 ($2fD <$

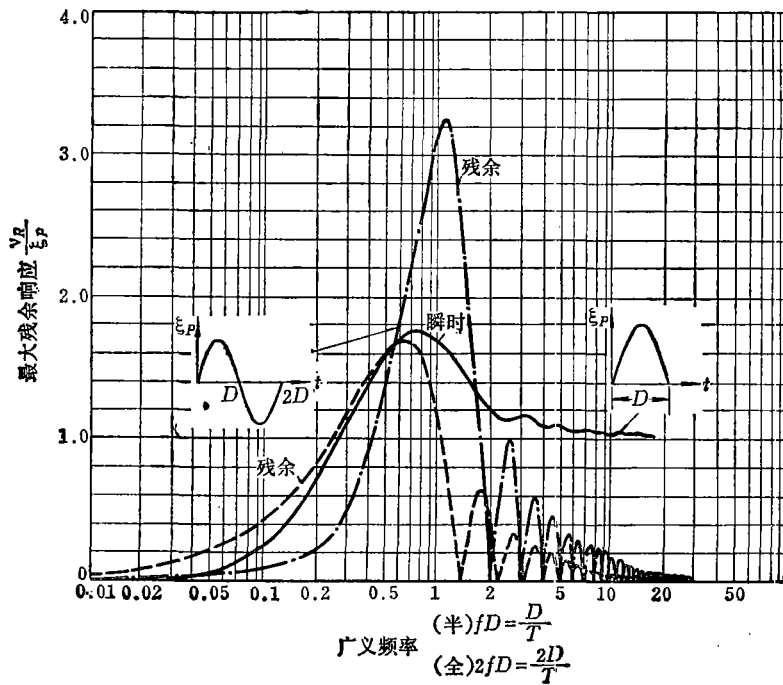


图4 (半) 正弦脉冲激励的响应谱

Fig.4 Response spectrograms of (half) Sine impact excitation

表2 几种计算结果的比较

Table 2 Comparison of several computer results

计算情况	当量刚度 \bar{K} (kgf/cm)	f_1 (Hz)	广义频率 $2fD$	广义响应 $\frac{v_R}{\epsilon_P}$	总后座力 (kgf)	放大系数 β
		f_2 (Hz)				
1	576.1	18.35 50.56	0.815 2.245	2.663 0.773	12096	1.521
2	891.3	22.80 47.70	1.012 2.118	3.104 0.444	14087	1.761
3	1804.4	32.44 37.53	1.440 1.666	2.704 1.626	23672	2.959
4	2314.4	36.47 54.40	1.631 2.415	1.801 0.965	11920	1.490
5	2353.6	37.05 47.91	1.645 2.127	1.733 0.469	11734	1.466
6	2436.9	37.70 56.78	1.674 2.521	1.587 0.938	11632	1.453
7	5201.7	55.08 60.12	2.446 2.669	0.967 0.751	9656	1.207
8	7664.7	66.86 71.15	2.969 3.159	0.075 0.337	8653	1.082

0.1) 或很高 ($2fD > 6$), 它们的残余响应值不会大于 0.4。此时的连续冲击响应值不会叠加, 设计是匹配的。

(2) 如果所设计的结构系统的广义频率居中 ($0.1 < 2fD < 0.6$), 其残余响应谱将是波动变化的。这时所设计的结构稍有变化, 都会显著地改变残余响应值。尤其要避免 $2fD = 1$ 的敏感区及其 $2fD = 2.5$ 、3.5 等各峰值区。

(3) 在居中的广义频段内, 往往正是结构常出现的频段。若使一阶频率满足残余响应低值要求, 可有几个方案付诸实现; 但若使二阶也满足此要求, 就比较困难。表 2 中情况 3 就因二阶频率较差, 使响应值比前二种情况都大。而最后一种情况, 两个频率都在残余响应低值区, 所以响应后座力几乎没有叠加现象。

(4) 在设计阶段进行动强度计算时, 先只需求系统的最低 2~3 阶频率。它所对应的广义频率落到残余响应的低值区而认为满意后, 再全部计算出动响应结果。对其他类型的脉冲也有相应的残余谱图可供使用^[6]。

五、结 语

通过以上计算分析, 我们明确了航炮与支承结构的匹配要求, 针对具体结构可计算绘制出相应的匹配设计曲线。再应用残余响应谱来实现其匹配要求, 从而完成了动力设计的步骤, 以保证满足动强度要求。

参 考 文 献

- [1] Sahlin, S., Nilsson, L., 著, 朱可善译, 冲击过程中应力和应变传播的理论分析, 力学译丛, (1976), 6。
- [2] 何连珠, 飞机航炮与其支承结构的设计要求, 非线性程序应用交流会论文集 (下册), (1983), 8。
- [3] 沈阳飞机公司发展部等航炮课题组, 地面板簧射击实测分析, 沈阳飞机公司, (1979)。
- [4] LOCKHEED AIRCRAFT CORPORATION, Stress Memo No 125, January 15, (1960)。
- [5] 何连珠, 机炮梁系统对动载系列的响应分析, 飞机设计, (1981), 4。
- [6] HARRIS, C. M. and CREDE, C. E., Shock and Vibration Handbook Chapter 23.

REQUIREMENTS AND DESIGN METHOD FOR MATCHING AIRCRAFT GUNS WITH THEIR SUPPORTING STRUCTURE

He Lianzhu and Zhao Peilin
(*Shengyang Aircraft Corporation*)

Abstract

In aircraft structural dynamic design the matching of the guns with their supporting structure is one of the most important tasks on which hinges the success or failure of the structural design.

The design curves for matching the guns with their supporting structure can be obtained from the response calculation of the plate-spring system supporting the gun on the ground, the model structure tested on the ground and the actual structure. A set of matching curves is given for engineering application. Then, the matching design can be accomplished by means of impact load spectrograms so as to perform the optimal structural design and to make further improvement on dynamic strength program.

编辑部启事

本刊自 1985 年开始, 由季刊改为双月刊, 每双月廿日经国防工业出版社出版, 国内由北京邮局报刊发行局直订科发行; 即外埠读者通过邮局汇款 (勿寄现金或邮票) 直接向该科订阅。银行汇款帐号: 北京朝阳区九龙山分理处 5402-8。汇款时请将订阅单位、姓名、详细地址写清楚, 并在汇款单附言上注明订阅的份数和起止期、刊名。《航空学报》国内发行代号: 82-326。每期价格 1 元, 全年 6 元。北京市及郊区县的读者可向就近邮局订阅。国外仍由中国国际书店发行。考虑 1985 年出版刊期和发行方式变更可能使少数读者漏订, 《航空学报》编辑部可以为读者补订, 订费汇至北京市人民银行海淀区办东升路分理处 8801-105 帐户, 或由邮局汇款至北京市学院路 37 号《航空学报》编辑部 (电话: 277247), 同样也要注明订阅的份数及起止期, 订阅单位、姓名及详细地址。