

主动结构刚度设计法在 CJ818 飞机设计上的应用研究

张佳佳 何景武 胡锦涛 刘星北 杨立文

(上海飞机设计研究所, 北京航空航天大学大型飞机高级人才培训班)

摘要: 在飞机结构设计过程中, 相对于结构强度设计而言, 结构刚度设计的指标通常不太明确, 只是一些定性的指标, 而结构刚度设计又在飞机设计过程中占有举足轻重的地位, 它将关系到飞机研制的成功与否, 直接影响到飞机研制的周期、费用和可靠性。主动结构刚度设计法的应用将有效地缩短研制周期、减少研制费用, 提高飞机可靠性。从结构刚度设计的角度出发, 分析了 CJ818 飞机结构刚度设计方面的问题和特点, 讨论了以往被动的结构刚度设计理念和设计中存在的问题, 以实际工程应用为出发点, 提出了主动结构刚度设计的结构设计理念和设计方法, 给出了大型客机主动结构刚度设计方案的分析过程。

关键词: 结构设计; 刚度方法; 飞机设计

0 引言

现阶段, 由于我国国民经济的不断发展, 国内民航业对大型客机特别是 100 座 ~ 200 座级单通道飞机有较大的需求。这样的条件给了我国自行研制大型客机一个良好的历史机遇。CJ818 飞机就是在这一机遇下, 我们自行研制的 150 座级以上的干线客机。

结构刚度问题是大型民用客机设计、研制当中必然要遇到、也是必须要解决的一个关键的设计问题。所以, 在大型民用客机的设计当中, 必须提前考虑和研究结构的刚度设计问题。

从以往的飞机结构设计情况来看, 在飞机的总体设计阶段, 飞机结构刚度设计要求通常是比较笼统、含糊不清, 而且是不可操作的。设计人员通常知道结构刚度设计的重要性, 但是却无法给出飞机结构刚度设计的具体要求, 就更谈不上结构刚度设计指标的确定, 使得结构刚度设计工作非常被动, 具有一定的盲目性。而对于大型民用客机结构来说, 由于其外形尺寸较大、结构连接件较多, 机身框间距、机翼肋间距较大, 结构可靠性要求高等一系列问题, 使得大飞机的结构刚度问题更为复杂。因此, 十分有必要就大型客机的结构刚度问题进行充分和必要的研究及分析, 尤其是在大型客机的方案设计阶段必须考虑结构刚度的设计问题, 为飞机后续的进一步设计提供支持。由此可见, 合理、科学的大型飞机的结构设计, 应该以提高飞机结构的使用效率、给出合适的结构刚度及其分布、追求较低的结构设计重量、提高飞机结构的可靠性等, 作为飞机结构的设计目标。

1 CJ818 大型客机设计中面临的结构

刚度问题

众所周知, 刚度是指受外力作用的材料、构件或结构抵抗变形的能力。结构的刚度取决于结构材料的性能、结构的几何尺寸和边界条件。大型客机面临的刚度问题主要是零件刚度问题和结构刚度问题。零件刚度问题主要包括零件的拉压刚度 EA 、弯曲刚度 EI 、剪切刚度 GA 及扭转刚度 GI 。而结构刚度问题主要包括结构连接形式、结构的传力特性、结构件的组合方式和结构件的工作环境等。

对于大型飞机来说, 由于其结构尺寸较军机及支线客机都大, 因此, 从结构刚度特性方面考虑, 必然会带来以下问题:

(1) 结构零部件增多, 结构的连续性不好, 从而导致结构刚度下降, 结构刚度分布不连续, 刚度分布规律难以掌控。

(2) 结构的连接件、连接面增多, 结构的连结关系复杂, 则结构的刚度特性在结构连接处会发生较大变化, 使得结构的内力传递和结构形变发生变化, 使得结构的整体刚度和局部刚度产生较大的变化。

(3) 结构变形的增大必然会对飞机的整体性能和功能产生一定的影响, 如: 变形会影响飞机飞行的气动性能, 对于具有运动机构的结构构件, 结构变形会对机构的运动精度、运动性能和运动轨迹产生一定的影响。

(4) 由于飞机设计对重量要求非常苛刻, 所以在满足产品重量要求的前提下, 如何保证结构的刚度要求就显得尤为重要。

(5)由于结构的实际尺寸跨度较大,所以机翼的上蒙皮等抗压结构的稳定性设计问题必会更突出,如何调整和改善结构的刚度特性,使结构满足稳定性设计要求,是大展弦比飞机必须要解决的问题。

具体到 CJ818 大型客机设计过程中,结构刚度问题主要归结为以下 18 个问题:

- (1)结构刚度设计要求指标的分析、确定;
- (2)结构变形的控制;
- (3)载荷与结构的刚度匹配问题;
- (4)结构内力的传递及分配;
- (5)结构零、组件的刚度设计问题;
- (6)结构连接刚度特性;
- (7)结构稳定性问题;
- (8)开口结构的刚度问题;
- (9)结构固有动力特性分析;
- (10)结构动力响应问题;
- (11)噪声问题;
- (12)抗坠毁(碰撞)设计问题;
- (13)减振、防振及振动控制问题;
- (14)流固耦合问题;
- (15)结构动强度问题;
- (16)预应力等因数对结构刚度特性的影响;
- (17)气动弹性设计问题;
- (18)结构刚度优化设计问题。

以上提到的这些结构刚度设计问题,都会在飞机结构设计过程中遇到,它们既有联系,又具有各自的特点。因此,必须寻找一种即能统一考虑,又能分别处理的工程设计方法来系统地分析和研究飞机的结构刚度设计问题。传统的被动的结构刚度设计方法已无法满足这一要求,而主动结构刚度设计法正是从实际工程设计中总结出来的,解决这类问题的一个有效的结构设计方法。

2 主动结构刚度设计法分析

根据结构强度的设计要求,结构强度的设计方法、设计思路通常比较明确,而结构刚度设计却要麻烦得多。首先,飞机的结构刚度设计指标不是很明确,只是一些定性的设计指标。这也就说明,结构刚度要求不能像结构强度要求那样很明确、很具体。关于这个问题,主要是因为大型客机设计过程中具体要求不一样。因此,在结构刚度设计方面,不可能给出一个统一的、确定的指标,只能给出一些原则上的要求,要具体问题具体分析。

CJ818大型客机的结构件尺寸较大、零件的数目

较多、结构连接件的数目也较多;机身框间距、翼面肋间距也相对较大。这些结构上的特点,都将严重地影响到飞机结构的刚度特性。而大型飞机的结构刚度特性又直接影响到飞机结构的动力特性,包括:气动弹性特性、内力传递分配问题、气动载荷分布问题、飞机的飞行性能、仪器设备以及人员工作的机械环境、结构变形控制问题、结构开口问题以及飞机的安全性和可靠性等多个方面。因此,从大型客机的结构特点和设计要求考虑,大型飞机的结构刚度设计必然是一个非常突出的结构设计问题,也是结构设计、研制当中必然要遇到、必须要解决的一个关键的设计问题。所以,在大型客机的设计当中,必须提前主动地考虑和研究结构的刚度设计问题。

主动的结构刚度设计,应该是贯穿于产品的整个研发过程,对产品的各个设计阶段都应明确地提出结构刚度的设计要求。相对于被动的结构刚度设计方法来说,主动的结构刚度设计,首先应该是产品结构刚度设计指标的分析、确定,给出定量的结构刚度设计指标,以指导后续的结构设计工作。主动结构刚度设计方法的分析流程见图 1。

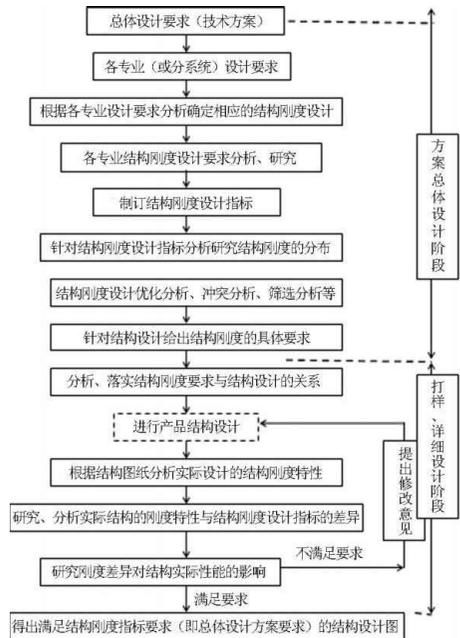


图 1 主动刚度设计方法流程

主动结构刚度设计方法涉及到的具体问题很多。在结构刚度设计的各个环节中应特别关注的要点主要有以下三个方面。

(1)结构刚度指标的分析确定

首先,对大型客机总体设计要求及结构设计要求进行分析,了解大型客机的总体设计要求、行业标准及适航要求,确定设计要求、分析方案、明确

分析方法及思路。其次,了解大型客机各专业设计要求,分析各专业设计要求与结构刚度的关系,研究各专业设计要求对结构刚度的影响,明确飞机各专业设计要求与结构刚度的关系,估计其影响程度。最后,研究各种刚度设计指标之间的关系,分析各类刚度指标的特点及可能存在的问题。

正确地确定结构刚度指标,是后续结构设计工作的依据,是保证结构设计成功的关键。所以,要对产品的总体设计要求进行深入、细致的分析、换算和研究,最后给出一套具体的、可操作的刚度设计要求数据,以指导结构设计工作的开展。

(2)如何将结构刚度设计指标贯彻到结构设计当中

结构刚度设计指标确定以后,如何将结构的刚度设计要求贯彻、落实到结构设计工作中是一个关键问题。其中涉及到结构的构造形式、主承力结构的布置、结构的选材以及结构重量的控制等多方面的设计问题。必要时还应考虑结构刚度的优化设计,即在可选的结构构型体系范围内,在满足优化目标的前提下,寻找最为理想的结构形式。

(3)结构的实际刚度特性与刚度设计指标之间的关系

对于结构的初步设计结果,其刚度特性与刚度设计指标之间肯定存在有一定的差异。所以,应进行结构刚度特性的验算,考察一下结构刚度特性与刚度设计指标之间的差异,分析其产生的原因及其对结构刚度特性乃至结构整体性能的影响,研究改善和减少这种差异的方法。

3 主动刚度设计方法在 CJ818大型客机上的应用

主动刚度设计概念是一种结构设计的理念,是一种新的结构设计方法,在以往的飞机结构设计中没有应用过主动结构刚度设计的方法和理念。根据 CJ818大型客机结构设计的要求,就以下一些典型的结构刚度设计问题作了较为深入的分析 and 研究。

3.1 满足高效巡航要求的机翼结构刚度设计

飞机在巡航速度飞行时,对机翼的攻角具有明确的要求,以获得最佳的续航效果。通常机翼结构的扭转变形会改变机翼的扭转角,以至于飞机的巡航效果不够理想。所以,通常机翼设计时事先沿翼展方向给出一个渐变的扭转角,以保证在飞机巡航时结构的弹性变形不至于对飞机的巡航性能产生较

大的影响。因此,机翼的沿翼展方向渐变的扭转角取多少为好,这就是一个典型的结构刚度设计问题。利用主动结构刚度设计法的理念及思路,其解决途径及步骤为:

(1)分析、研究巡航时飞机攻角的具体要求和特点;

(2)分析已确定的机翼延展向不同截面的安装角 $\alpha(z)$;

(3)分析飞机巡航状态下机翼的气动载荷及其分布;

(4)分析该气动载荷作用下机翼的扭矩角沿展向分布 $\tau(z)$;

(5)计算求解,当 $U(z)$ 与 $U(z)$ 时的机翼扭转刚度分布 $GJ(z)$;

(6)根据机翼的扭转刚度分布 $GJ(z)$,进行机翼结构设计。

通过分析巡航状态下的机翼弯扭刚度特点及变形规律,得出机翼扭转刚度分布曲线及机翼弯曲刚度分布曲线,以便进行机翼结构设计。

3.2 满足失速要求的机翼结构刚度设计

对于没有安装角的机翼,在飞机进入失速状态时,翼尖部分会先出现失速,这对于保证飞行安全是不利的。因此,机翼设计适当的安装角,可以使翼尖气流的分离延缓,达到内翼部分先失速,而翼尖部分后发生失速。这样就可以保证在飞机刚进入失速状态时,飞机的副翼仍然具有操控作用,以此来操控飞机尽快脱离失速状态。

此时,机翼的安装角取多少合适,沿翼展渐变的扭转角取多少合适,也是一个非常麻烦的结构刚度问题,此问题的主动刚度分析方法与 3.1节相同,主要分析飞机失速状态下的机翼弯扭刚度特点及变形规律,给出机翼扭转刚度分布曲线以及机翼弯曲刚度分布曲线,使机翼设计满足失速要求。

3.3 机翼气动载荷与机翼结构刚度的匹配

机翼上气动载荷的合力作用点非常重要,根据飞机的使用包线,该合力作用点在机翼上通常是一个有限区域。不同点的载荷情况对机翼的扭矩分布会不一样,且会产生较大的影响,因为扭矩对机翼攻角的影响较大,这样导致的问题有: 1 刚心的位置放在何处才能使机翼的扭矩较小? 2 机翼扭转刚度、弯曲刚度取多少、如何分布,才能保证机翼弯曲变形、扭转变形最小或满足规定的设计要求? 3 机翼的主结构如何安排才能使结构的内力传递更为合理,能够很好地发挥结构效率? 如何满足机翼上有

变形控制要求的部位?

机翼上的刚心位置是一个非常重要的参数,刚心的位置对结构的传力特性、振动特性及结构变形有着重要的影响,而机翼结构的刚心位置是设计出来的,主要考虑以下几个方面:

(1)根据总体的结构布置要求,分析机翼结构的弯曲刚度、扭转刚度及刚心范围;

(2)初步给出满足刚心要求的机翼扭转刚度及弯曲刚度,确定机翼刚心线的参考位置;

(3)计算、分析典型载荷情况下机翼结构的变形情况和传力特性,掌握机翼内力的变化规律和特点,确定机翼内力分配规律和特点;

(4)分析机翼结构的变形情况和传力特性是否满足相关要求,如不满足则修正机翼的刚度特性并返回第(2)条,直至满足为止;

(5)给出机翼结构的刚度分布曲线。

3.4 满足结构动力要求的结构刚度设计问题

以 CJ818机翼为例。机翼结构的动力响应问题直接影响结构的使用寿命、飞机的安全性、舒适性等多个方面,具体问题有:

(1)结构动响应的设计要求,即设计指标的确定问题;

(2)什么样的结构刚度才能满足结构动响应的设计要求;

(3)重点部位的减震、隔振及振动控制问题;

(4)结构固有动力特性的设计问题,包括频率、振型及节线。

显然,结构动力响应问题是关系到 CJ818大型客机研制是否成功的关键问题,在此,运用主动刚度设计方法,给出分析设计思路:

(1)根据飞机各专业(系统)的设计要求及相关规范,分析、确定结构动响应的设计要求(即确定设计指标);

(2)分析、确定飞机在全寿命周期内的动载荷及其特点,研究飞机全寿命期内各个阶段可能存在的动力环境方面的问题,研究这些问题产生的原因,给出动载荷的规律及特点,找出典型的动载荷;

(3)分析给出结构刚度的初值,并进行不同动载荷作用下的结构动力响应分析计算,给出机翼结构动力响应与机翼弯扭刚度之间的关系及规律;

(4)分析动响应计算结果与动响应指标的相容问题,如不满足则修改结构刚度,再进行结构动响应分析计算;

(5)对调整结构刚度也难于满足动响应要求的

部位,或对动响应要求较高的部位,进行减振、隔振及振动控制设计研究;

(6)分析研究结构的固有动力特性,分析结构动响应与结构固有动力特性的关系;

(7)结合各方面分析计算,给出满足设计要求的机翼结构弯扭刚度特性。

3.5 其他机翼结构的刚度问题

(1)满足副翼操纵效率要求的机翼结构刚度设计问题

分析机翼扭转刚度、弯曲刚度对副翼操纵效率的影响,机翼刚心线位置的分析确定,给出机翼弯扭刚度数据,给出飞机飞行速度与副翼效率关系曲线。

(2)满足翼面弯曲发散要求的机翼结构刚度设计研究

研究翼面弯曲发散与结构刚度的关系,分析机翼弯曲发散问题的特点,给出机翼弯曲发散临界速度与机翼结构刚度之间的关系。

(3)满足翼面扭转发散要求的机翼结构刚度设计研究

研究翼面扭转发散与结构刚度的关系,分析机翼扭转发散问题的特点,给出机翼扭转发散临界速度与机翼结构刚度之间的关系以及机翼刚心线位置。

(4)结构固有动力特性要求与结构刚度设计研究

分析满足结构固有动力特性要求的机翼弯扭刚度分布,给出机翼的固有频率、振型及节线与机翼弯扭刚度之间的关系及规律。

(5)机翼结构刚度特性综合分析

分析不同设计要求情况下机翼结构刚度特性之间的关系,找出能够适应飞机各种设计要求的结构刚度数据,确定机翼结构刚度设计要求。

(6)机翼结构刚度设计指标的综合评定

分析各种机翼结构刚度设计指标的可靠性,分析可能存在的问题,分析允许刚度指标摄动的范围,评议结构刚度设计指标。

4 结论

高效结构的刚度设计问题是大型飞机结构设计的重要组成部分,是衡量飞机结构设计水平的一个标志。结构刚度设计所涉及到的问题很多,相互的联系很密切也很复杂,所以在飞机结构设计当中一定要结合飞机的设计要求和使用要求,抓住主要矛盾和问题,综合其他结构设计方面的要求,给出性能

优越的机体结构。

该方法的主要特点是开辟了一种飞机结构设计理念,是一种新型结构刚度设计的思路,是将以前结构刚度被动设计转换为结构刚度的主动设计。

该方法所应用到的理论和技术都是工程上成熟的设计技术,因此,相应的计算、分析必将是合理、正确的。关键问题是如何将各种成熟的结构设计、分

析理论和工程技术进行很好的整合及应用。

参考文献:

- [1]王志明,杨为清.现代设计方法在工程结构件强度及刚度设计中的应用[J].中国机械工程,1999,10(8).
- [2]楼梦麟,吴京宁.结构主动变刚度控制中的若干问题[J].同济大学学报,2001,29(4).