

基于随机搜索法的机匣安装边螺栓连接优化设计

The Optimal Design of Bolted Joint of Aeroengine Casing Based on Random Search Method

陈勇 柏树生 艾延廷 赵丹 / 沈阳航空航天大学航空航天工程学部

摘要: 引入一种简便的约束优化方法——随机搜索法, 通过建立机匣安装边螺栓连接的优化模型, 基于Matlab平台进行了实例计算和分析, 结果表明该方法应用于机匣安装边的螺栓连接优化是可行的。

关键词: 航空发动机; 螺栓连接; 机匣安装边; 优化设计; 随机搜索法

Keywords: aeroengine; bolted joint; side casing installation; optimization design; random search method

0 引言

螺栓连接具有连接刚度好、重量轻、结构简单和拆装方便等优点, 因此广泛应用于航空发动机的结构连接中。螺栓连接是工程结构中普遍采用的一种连

接方式, 作为连接件, 其强度和可靠性直接影响影响到包括连接件在内的整个结构的安全, 同时其重量又关系到整个结构的减重效果。因此, 兼顾强度和重量是航空发动机螺栓连接结构优化设计的重点。

螺栓连接结构设计优化的目的是从安全、可靠、经济的角度达到连接结构重量最轻、螺栓数量最少, 从而能改善装配性。由于本文采用的计算用模型的结构较为简单, 因此选用随机方向探索法

成起到干扰作用, 二元喷管中喷流不易形成马赫盘, 从而也起到降低喷流红外辐射的作用。从雷达隐身设计的角度, 二元喷管出口修形设计能够将雷达波反射到不易被雷达探测的角度上, 从而降低后向喷管的雷达RCS, 同时二元喷管修形配合飞机进行合理设计可以将雷达反射集中控制在特定的方向内。

4) 宽高比的选取

宽高比对发动机红外辐射和雷达反射回波都有较大影响, 但同时宽高比的选取往往又受到飞机外形轮廓和推力损失的限制, 因此在发动机隐身的设计中, 实际宽高比对发动机红外辐射和雷达的影响性要降低的多。一般来讲, 宽高比在6以上不适合在战斗机的发动机上采用。

4 结论

本文针对二元矢量喷管进行了相似性的全三维建模, 并利用有限体积法对二元矢量喷管在非偏转下的内外混合流场进行了数值模拟计算, 分析了二元喷管的壁面温度分布和喷流分布情况。同时针对喷口修形的二元喷管隐身设计技术进行了初步分析。

研究结果表明, 二元喷管能够促进喷流与外界大气的强化混合, 对缩短高温核心区、加快尾喷流沿流向的温度衰减有明显效果, 在750K等温线内, 二元喷管比轴对称喷管核心流长度缩短比例达到30%左右, 可见对抑制尾喷流的红外辐射有一定好处。二元喷管内壁面温度分布具有不同于轴对称喷管的特点, 温度分布不均匀, 尤其在壁面的中间区域需要进行合理的冷却设计。 AST

参考文献

- [1] 张考, 马东立. 军用飞机生存力与隐身设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] Siegel R, Howell J R. Thermal radiation heat transfer [M]. 4th edition. New York: Taylor & Francis, 2002.
- [3] 邓洪伟, 邵万仁, 尚守堂. 飞机/发动机一体化隐身技术初探[J]. 隐身技术, 2011(1).
- [4] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.

作者简介

邓洪伟, 工程师, 主要从事发动机红外及雷达隐身设计技术研究。

进行设计优化。

1 随机探索法概述

1.1 基本原理

随机探索法是约束最优化问题的一种常用直接方法,属于约束随机法。这类方法一般包括随机选择初始点,随机选择探索方向和随机选取步长等步骤。对于求解

$$\begin{aligned} \min f(x) \quad x \in R^n \\ \text{s.t. } g_u(x) \leq 0 \quad u = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

这类约束优化设计问题,采用约束随机方向搜索法的迭代格式为:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)}$$

式中, $\Delta x^{(k)}$ 为第 k 次迭代的随机搜索方向向量。

如图1所示,在约束可行域内选取一个初始点 $x^{(0)}$ 。为了确定本次迭代的搜索方向,以若干个不同随机方向的向量 Δx 进行试验。若 $f(x^{(0)} + \Delta x) < f(x^{(0)})$,则以 Δx 为搜索方向,取适当步长因子,在不破坏约束条件时,前进一步,获得新点 x ; 若 $f(x) < f(x^{(0)})$,则将起始点移至点 x ,重复前面的过程。如无法满足上述条件,则需将步长缩短,直至取得一个好的可行点。如此周而复始,直至迭代步长很小时结束计算过程,取得约束最优解。

1.2 算法步骤

约束随机方向搜索算法步骤如下:

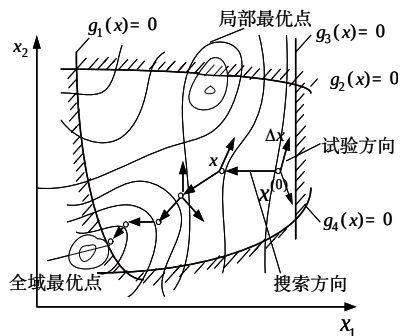


图1 约束随机方向探索法的基本原理

1) 随机选择一个可行的初始点 $x^{(0)} \in D$, 并令迭代序号 $k=1$, 取步长因子 α (可取要求计算精度 ε 的足够倍数), 计算目标函数 $f(x) = f(x^{(0)})$ 。

2) 产生 n 个 $[-1, +1]$ 之间的随机数, 并按照式

$$S^{(k)} = \frac{1}{(r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2)^{1/2}} \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{Bmatrix}$$

构造随机方向向量 $S^{(k)}$ 。

3) 计算新点 $x' = x^{(k)} + \alpha S^{(k)}$, 若 x' 不可行则转向步骤(2), 否则计算的目标函数值为: $f(x) = f(x')$ 。

4) 比较函数值 f_0 和 f , 若 $f > f_0$, 则重复步骤(2)和步骤(3); 若 $f < f_0$, 则令 $x^{(k)} = x'$, $f_0 = f$, 转向步骤(3)。

5) 若迭代次数 $k \geq N$ 超过规定次数还不能产生一个好点 x' , 则减小 α 值, 转向下一步。

6) 若 α 值已减小到小于给定的计算精度 ε 时仍然得不到一个更好的点, 则取 $x' \approx x^{(k)}$ 为最优点, 并结束计算; 否则转步骤(2)。

2 螺栓连接的优化设计

2.1 螺栓连接的性质

当安装边用螺帽和螺栓连接在一起时, 螺帽靠扭矩拉紧螺纹, 在螺杆上产生拉力, 而在安装边上产生大小相等、方向相反的压缩力。这些力引起螺栓的拉伸, 安装边的压缩, 其中, 螺栓刚度为 $\text{tg}\theta = k_b$, 安装边刚度为 $\text{tg}\phi = k_j$ 。由于 $k_j > k_b$, 因此安装边的载荷挠度曲线比螺栓挠度曲线要陡。螺栓初始载荷为 P_1 , 螺栓连接特性曲线如图2所示。

螺栓连接的主要特性是指其在工作载荷作用下维持安装边受压的可持续性, 当夹紧部分维持压缩时, 大部分的外加载荷应由安装边而不是螺栓来承受。

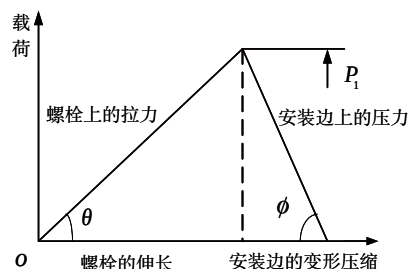


图2 螺栓连接特性曲线

预紧后, 螺栓和安装边承受的应变范围是相等的, 可以把它们看作是平行的弹簧, 由于安装边比螺栓的刚性更大, 主要的施加载荷由安装边来承受, 因而其压缩状态在减小。然而, 一旦接合处超出了压缩范围, 安装边和螺栓就不再是平行的弹簧, 外部负载将完全由螺栓承受。此时, 维持接合处的压缩, 是保护螺栓免受疲劳载荷影响的关键。

接合处和螺栓各自承受的载荷之间的相互关系取决于外部载荷的相互关系, 给定如下:

$$F_b = P_0 + \frac{k_b}{k_b + k_j} F_e \quad (1)$$

$$F_j = P_0 - \frac{k_j}{k_b + k_j} F_e \quad (2)$$

其中, F_b 为螺栓施加的载荷, F_j 为接合处施加的载荷, F_e 为外部载荷, P_0 为预紧力。

从公式(1)可以看出, 当 k_j 绝对大于 k_b 时, 螺栓承受的外部载荷几乎为零, 接合处保持压缩状态。然而, 当外部载荷达到预紧力值时, 接合处将不再受压, 当 $k_j > k_b$ 时, 螺栓将承受一部分的外部载荷, 同时螺栓也需要一个比使接合面不再受压时的预紧力更大的外部载荷。

从疲劳的观点来看, 这是设计问题中的基本特征。安装边或接合处需要有与螺栓相关的足够的刚度, 既可以保护螺栓免受外部载荷的影响, 但也不能太大以至于使接合处过早失去压缩量。

2.2 螺栓连接的设计变量、目标函数及约束条件

1) 确定螺栓连接的设计变量

螺栓连接的设计需确定螺栓直径 d 、数量 n 和长度 L ,长度 L 需由具体的机匣安装边厚度来确定,故需计算确定的设计变量为 n 和 d ,即:

$$X = [n, d]^T = [x_1, x_2]^T$$

2) 建立目标函数

取螺栓组连接重量 M 最轻为目标。当螺栓的长度、材料和加工条件一定时,螺栓的重量与 n 、 d 值成正比,则有:

$$M = n\rho\pi d^2 L / (4f)$$

其中, ρ 为螺栓材料比重,取 $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$; L 为长度, f 认为是常量。因此,螺栓连接的目标函数为:

$$f = 1.551 \times 10^{-4} x_1 x_2^2$$

3) 约束条件

由经验可知,设计螺栓时,螺栓数量的确定既要考虑密封性要求,又要兼顾装配时装卸工具的工作空间,即扳手空间,并使安装边尺寸紧凑,所以,应综合考虑以下要求和约束条件。

a 强度约束条件

螺栓在循环载荷下工作时,为了防止安装边的结合面分离,保证螺栓强度,应满足其强度条件,即: $P_{\text{总}} / (nA_s) \leq [\sigma]$ 。式中, A_s 为螺栓的危险截面面积, $A_s = \pi d_1^2 / 4$, 取 $d_1 = 0.85d$ 。 $P_{\text{总}}$ 为安装边承受的总载荷, $P_{\text{总}} = P_0 + K_c F_2 + P_t$, P_0 为螺栓预紧力, K_c 为刚性系数, F_2 为修正的螺栓载荷, P_t 为温差载荷。

经过整理得到:

$$g_1(x) = \frac{P_0 + K_c F_2 + P_t}{n\pi(0.85d)^2 / 4} - [\sigma] \leq 0$$

b 螺栓连接密封性约束条件

考虑密封安全,螺栓间距应小于 $7d$,故密封约束条件为:

$$g_2(x) = \frac{2\pi r}{n} - 7d \leq 0$$

c 扳手工作空间约束条件

考虑扳手工作空间,螺栓间距应大于 $3d$,故扳手的工作空间的约束条件为:

$$g_3(x) = 3d - \frac{2\pi r}{n} \leq 0$$

d 螺栓直径的限制条件

考虑螺栓直径太小易拧断,故要求 $d \geq 5 \text{ mm}$,即:

$$g_4(x) = 5 - d \leq 0$$

3 优化方法及设计实例

3.1 优化方法

针对上述优化设计的数学模型,采用约束随机方向搜索法,运用Matlab语言编写目标函数和约束条件的子程序,运行求解,得到最佳优化参数。

3.2 设计实例及结果

已知某机匣安装边及螺栓所选用的材料均为1Cr11Ni2W2MoV,为了简化模型,设定安装边高度 a 和 b 、厚度 t 均为定值。经计算,螺栓预紧力 P 为8032 N,修正的螺栓载荷 F_2 为66413 N。考虑工作环境的影响,温度为307℃,存在温差载荷 P_t 为220 N,刚性系数 K_c 为0.95。

代入数据,经计算,得到的约束条件方程如下:

$$g_1(x) = \frac{426.4}{x_2^2} - x_1 \leq 0$$

$$g_2(x) = \frac{280\pi}{x_1} - 7x_2 \leq 0$$

$$g_3(x) = 3x_2 - \frac{280\pi}{x_1} \leq 0$$

$$g_4(x) = 5 - x_2 \leq 0$$

采用随机搜索法,调试Matlab程序,经运算,得到的最佳参数为: $x = [25.1327 \ 5.0000]^T$, $f = 0.2694$ 。

由于螺栓个数一般选取为偶数,经过取整、标准化得到: $d = 5$, $n = 26$ 。原设计方案中,初选螺栓直径为6mm,数量为30个。优化后的螺栓连接减轻了重量,减少了成本。

4 结论

本文采用随机搜索法对某航空发动机机匣安装边螺栓连接模型进行了优化设计,旨在保证螺栓连接在强度可靠和气密性良好的前提下,尽可能地减轻重量,减少成本,为发动机减重做贡献。通过实例分析得出,相对于原选定的螺栓,优化后螺栓的重量有明显的减轻;此优化方法运算程序简单,使用方便,收敛速度较快,优化效果明显,是一种有效的机械优化设计方法。

AST

参考文献

- [1] 陈立周.机械优化设计方法[M].北京:冶金工业出版社,2005:106-108.
- [2] 赵武云,樊英生.螺栓组联接的可靠性优化设计[J].甘肃农业大学学报,2000,35(3):307-310.
- [3] Optimizing Bolted Joint Geometry for Fatigue Resistance[J]. Integrated Systems Research, Inc, 2008(5).
- [4] 《航空发动机设计手册》总编委会.载荷及机匣承力件强度分析(第17册)[M].北京:航空工业出版社,2001:164-174.
- [5] 李万祥.工程优化设计与MATLAB实现[M].北京:清华大学出版社,2010:125-127.

作者简介

陈勇,硕士研究生,从事航空发动机整机振动分析与抑制技术。

艾廷廷,博士,教授,主要从事航空发动机整机振动分析与抑制技术、结构声耦合分析技术、旋转机械状态监测与故障诊断、航空发动机试验与先进测试技术。

柏树生,硕士研究生,主要从事航空发动机整机振动分析与抑制技术。