

基于质量功能展开方法的电动静液作动器设计参数优化

李晶¹, 洪辉¹, 陆清², 吴双³

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 上海飞机设计研究院, 上海 201206;
3. 民用飞机模拟飞行国家重点实验室, 上海 201206)

摘要: 提出了基于 QFD(质量功能展开)的优化设计方法, 以 EHA(电动静液作动器)能耗最小和作动筒质量最轻为目标, 满足强度约束条件, 定义 EHA 系统的参数关系矩阵 (PRM), 建立其优化设计模型. 以某型 EHA 设计参数为例, 应用遗传算法进行了优化. 优化后的 EHA 质量减轻 23.57%, 能耗降低 36.46%. 优化结果表明, 该设计方法值得在 EHA 设计中推广应用.

关键词: 电动静液作动器; 参数关系矩阵; 优化模型; 遗传算法

中图分类号: TH137.7

文献标志码: A

Optimization of Electro Hydrostatic Actuator Parameters Based on Quality Function Deployment Method

LI Jing¹, HONG Hui¹, LU Qing², WU Shuang³

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201206, China; 3. State Key Laboratory of Civil Aircraft Simulation Flight, Shanghai 201206, China)

Abstract: This paper proposed an optimization design method based on QFD (Quality Function Deployment). The EHA (Electro-Hydrostatic Actuator) system parametric relationship matrix (PRM) and constraint conditions were defined with the minimum energy consumption and the lightest actuator mass as the objective to establish its optimal design model. Finally, the genetic algorithm was used to optimize a certain type of EHA design parameter as an example. After optimization, the weight of EHA was reduced by 23.57% and the energy consumption was reduced by 36.46%. The optimization results show that this design method is worthy of promotion and application in EHA design.

Key words: electro-hydrostatic actuator; parameter relationship matrix; optimization model; genetic algorithm

EHA(electro hydrostatic actuator, 电动静液作动器)将电机、泵和执行器集成于一体, 结构紧凑, 功率密度大. 采用 EHA 结构实现飞控操纵, 有利于实现机载机电系统的综合; 同时, 可避免应用集中液压能源系统时的节流方式功率分配, 以及动力源与执行器间的长液压管路. 随着功率电传的发展, EHA 必然会在未来多电飞机中得到更广泛的应用^[1-3].

目前, 国内对于 EHA 的研究多专注于作动器的原理以及建模仿真分析、可靠性与故障诊断方面^[4-7]. EHA 传统设计方法主要是根据原始条件和数据初步设计出产品后检验是否符合设计要求; 当不符合要求时, 重新修改设计参数, 直至获得最终方案^[8-9]. 所遵行的过程一般可分为假设、分析、校核、校核后根据情况重新设计. 此种设计方法不仅周期长, 而且最终选定的方案通常仅是一种可行的而不是最优的设计.

本文引入优化思想支持 EHA 设计过程. 将实际问题转化为数学问题, 将具体工程问题的各种条件、约束、目标等转化为数学模型, 采用优化算法找到最优设计方案.

机载 EHA 作动系统复杂, 涵盖了诸如机械、液压、流体力学、控制等多门学科的知识, 需要运用多学科设计优化方法对其进行优化. 目前国内外在多学科优化方法的设计应用方面已开展了研究. Royset 等^[10]研究了基于可靠性的解耦优化结构设计. Li 等^[11]运用蚁群算法对星轮结构进行了优化. Sun 等^[12]利用粒子群算法对桥式起重机进行了结构优化. 董锋岩^[13]利用遗传算法对悬挂式基于软件

收稿日期: 2018-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(51275356, 51775383); 工信部民用飞机专项科研(MJZ-2018-S-52)

第一作者: 李晶(1972—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为液压系统设计及虚拟测试技术. E-mail: cynthia_li@tongji.edu.cn

ISIGHT 的电静液作动器结构分析与优化设计复合材料烟筒进行了优化设计. Hasancebi 等^[14]利用模拟退火算法对空间钢框架进行了优化设计. Andersson 等^[15]研究了多目标优化以及优化对于飞机作动架构选择的意义.

本文提出机载 EHA 作动系统的 QFD(quality function deployment, 质量功能展开)方法, 定义 EHA 系统的参数关系矩阵(parameters relation matrix, PRM). 根据矩阵中的权重系数建立 EHA 的理论优化模型, 并以某型 EHA 参数为算例, 应用遗传算法得出其优化结果.

1 EHA 工作原理及 QFD 方法介绍

1.1 EHA 工作原理

本文研究定排量-变转速 EHA. 图 1 为某型 EHA 外形图, 图 2 为其典型结构工作原理.

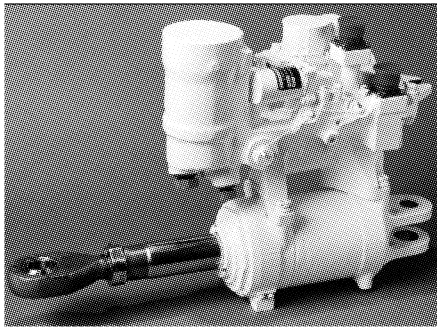


图 1 某型 EHA 外形图
Fig.1 Outline of EHA

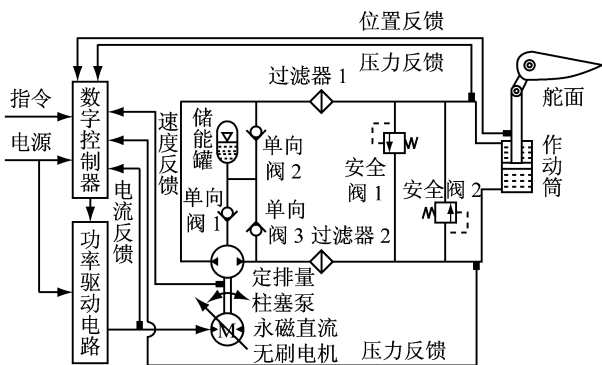


图 2 EHA 工作原理
Fig.2 Working principle of EHA

由图 2 可知, EHA 工作原理为: 数字控制器和功率控制器组成的控制电路, 控制永磁无刷直流电机的转速, 通过电机带动高速双向定排量柱塞泵旋转运动, 继而控制泵输出到作动筒的高压油的流量, 以容积调速方式完成对作动筒的控制. 电机的正反反转控制作动筒的伸出和收缩运动, 电机的转速控制

作动筒的运动速度.

1.2 设计结构矩阵和 QFD 方法

设计结构矩阵(design structure matrix, DSM)是由排列顺序相同的行列元素组成的方阵, 用于显示矩阵中元素间的交互关系. 根据 EHA 作动系统的实际构成和性能特征, 分析各部件之间的相互关联关系, 可以建立该系统的设计结构矩阵, 如图 3 所示. 由图可知, 飞机机体(A)将直接影响液压缸活塞面积(D)、泵尺寸(G)、电机尺寸(H)及飞控计算机(M); 液压缸活塞行程(E)与控制剖面(B)、铰链杆(C)及泵尺寸(G)、电机尺寸(H)等信息有关.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
机体 A	●			×			×	×					×
控制剖面 B	×	●											×
铰链杆 C		×	●										
活塞面积 D	×	×		●		×	×	×					
活塞行程 E		×	×		●		×	×					
系统压力 F		×	×	×		●							
泵尺寸 G		×	×	×	×		●						
电机尺寸 H				×		×	×	●			×	×	
反馈增益 I				×	×	×	×	×	●				
电力控制监测 J									×		●		×
电力变换单元 K									×			●	×
接线盒 L													●
飞控计算机 M	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	●

注: ×表示行列元素具有交互关系.

图 3 机载 EHA 作动系统设计结构矩阵(DSM)
Fig.3 Design structure matrix of airborne EHA actuating system

为进行 EHA 作动系统的优化设计, 必须综合图 3 中的各种因素, 选取合理的评价指标, 进行综合比较、决策.

DSM 反映了系统各部件之间的结构关联关系, 但要进行综合评价, 必然涉及系统的特征参数评价指标, 为此引入 QFD 方法.

QFD 方法立足于实际需要, 开展质量策划, 确定设计指标体系. 根据 QFD 方法, 可以定义系统的参数关系矩阵(parameters relation matrix, PRM), 以表达系统各部件与系统特征参数之间的关联程度. 不同系统特性对系统总的评价指标可以采用不同的权重系数予以表示. 对于机载 EHA, 其主要的特征参数包括: 质量、能耗、成本、外形尺寸、可控制性、可维修性、可靠性以及温度等. 经过分析, 并结合相关的专家知识, 可以总结出 EHA 的系统参数关系矩阵如表 1 所示.

此关系矩阵中, 系统特性在纵轴上列出, 系统参数在横轴上列出. 系统参数与系统特性间的相关性通过矩阵中的数字进行表达. 数字越高, 关系越强. 系统特性的权重, 表明它们的相对重要性.

表 1 某机载 EHA 作动系统的参数关系矩阵
Tab.1 Parameter relation matrix of airborne
EHA actuation system

系统特性	权重系数	系统参数									
		舵面面积	铰链杆	活塞面积	活塞行程	系统压力	泵尺寸	电机尺寸	电力转换	接线盒	飞控计算机
质量	5		1	5	5	5	5	5	3	1	1
能耗	3	3		3	1	1	5	5	5		
成本	1			3	3	3	5	5	5	1	1
外形尺寸	3		1	5	3	3	5	5	5	1	1
可控制性	5	5	3	5	3	5	1	3	3		5
可维修性	Y										
可靠性	Y										
温度	Y										

注:Y表示系统必须满足的需求.在EHA中,这些系统特性与参数相关性难以表达.

1.3 EHA 作动系统的多目标函数最优化设计

对于 EHA 作动系统,可以采用多目标函数的评价方法.若考虑 EHA 作动质量函数 f_w 、成本函数 f_c 、能耗函数 f_{en} 和误差函数 f_{er} ,则最小化 f_w 、 f_c 、 f_{en} 、 f_{er} 的设计问题,可以用一个统一的最小化极值函数来表示,即 EHA 作动系统总目标函数 $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$,其中 X_i 必须满足以下条件:

$$G_i \leq X_i \leq H_i, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

式中: G_i 、 H_i 代表 X_i 的约束条件,其可能是常数,也可能是 X_1, X_2, \dots, X_n 的函数.对于元件尺寸参数而言,约束量 G_i 、 H_i 则均为常数.

对于求函数 f_1, f_2, \dots, f_n 最小值的目标函数 F 可表示为

$$F = \left(\frac{f_1}{f_{10}}\right)^{r_1} + \left(\frac{f_2}{f_{20}}\right)^{r_2} + \dots + \left(\frac{f_i}{f_{i0}}\right)^{r_i} \quad (1)$$

式中: $f_{10}, f_{20}, \dots, f_{i0}$ 为一个初始可接受系统的函数值; r_1, r_2, \dots, r_i 则描述了不同目标函数的相对重要性,它们是 PRM 矩阵中权重系数 w_i 的函数

$$r_i = 1 + \frac{w_i + 1}{2} \quad (2)$$

这样,将 EHA 作动系统的最优化设计问题转化为带约束的求目标函数 F 最小值的数学问题.该方法不仅为 EHA 作动系统的最优化设计提供了理论支持,而且也可以推广到大多数机电一体化系统的优化设计过程中.

2 基于 QFD 方法的 EHA 优化模型

由 EHA 工作原理可知,作动系统功耗的直接来源是电动机.电动机将电能转化为液压能,推动作动

筒,使舵面产生动作.从电动机输出扭矩到柱塞泵输出功率之间有一定的功率损失,流体在液压管路中有一定的能量损失,最终作用于作动筒.

机载部件在满足性能要求的情况下,质量和能耗越小越好.所以对于飞机 EHA 作动系统来说,尽量追求质量减少,能耗降低是本文的目标.

针对典型定排量-变转速 EHA,应用上述多目标函数最优化设计方法建立 EHA 的理论优化模型.

2.1 能耗函数

活塞无杆腔面积 A_1 和排量 V 为设计变量,以活塞位移 S 时的电机能耗为目标函数.

作动筒克服负载输出力 F 为

$$F = p_1 A_1 - p_2 A_2 \quad (3)$$

式中: p_1 为供油压力; p_2 为回油压力; A_2 为有杆腔面积.

由于作动筒内部有泄漏,输出速度为

$$v = \frac{Q_t - C_{st}(p_1 - p_2)}{A_1} \quad (4)$$

式中: Q_t 为进入作动筒的液体流量; C_{st} 为作动筒泄漏系数.

作动时间为

$$t = \frac{SA_1}{Q_t - C_{st}(p_1 - p_2)} \quad (5)$$

管道中压力损失为

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} + \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (6)$$

式中: Δp_1 为沿程压力损失; Δp_2 为局部压力损失; λ 为局部阻力系数; ξ 为沿程阻力系数.

流量损失为

$$Q_l = 2\xi_1 \Delta p \quad (7)$$

式中: ξ_1 为泵的泄漏系数.

则柱塞泵输出的流量为

$$Q = Q_t + Q_l = A_1 v + C_{st}(p_1 - p_2) + 2\xi_1 \Delta p \quad (8)$$

又有

$$Q = Vn = V \frac{\omega}{2\pi}$$

式中: n 为电机转速; ω 为角速度; V 为泵的排量.

可得

$$\omega = 2\pi \frac{A_1 v + C_{st}(p_1 - p_2) + 2\xi_1 \Delta p}{V} \quad (9)$$

EHA 中,电机与泵直接相连,则作用在泵上的转矩为

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + K_{fric} \omega (p_a - p_b) \frac{V}{2\pi} \quad (10)$$

式中: J 为电机和泵的转动惯量; K_{fric} 为黏度系数;匀速转动则 $\frac{d\omega}{dt} = 0$; p_a 、 p_b 为柱塞泵的出口及进口压

力, $p_a = p_1 + \Delta p$, $p_b = p_2 - \Delta p$.

则目标函数电机在作动时间内的功耗为

$$f_{en} = T\omega t = \left[K_{fric}\omega^2(p_1 - p_2 + 2\Delta p) \cdot \frac{V}{2\pi Q_t - C_{st}(p_1 - p_2)} \right] \quad (11)$$

2.2 质量函数

图 4 为作动筒结构示意图.

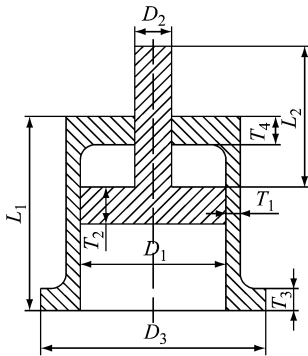


图 4 作动筒结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of actuating cylinder

选取以下 9 个设计变量:缸筒长度 L_1 , 活塞杆长度 L_2 , 缸体内径 D_1 , 活塞杆直径 D_2 , 法兰直径 D_3 , 缸筒厚度 T_1 , 活塞厚度 T_2 , 法兰厚度 T_3 , 缸底厚度 T_4 .

不考虑圆角影响,则作动筒质量函数可表达为

$$f_w = \frac{\pi}{4}\rho\{D_1 T_2 + D_2^2 L_2 + [(D_1 + 2T_1)^2 - D_1^2](L_1 - T_4 - T_3) + (D_3^2 - D_1^2)T_3 + [(D_1 + 2T_1)^2 - D_2^2]T_4\} \quad (12)$$

约束条件如下:

(1) 缸体壁厚约束, $T_1 \geq \frac{p_{max} D_1}{2[\sigma]}$; p_{max} 为作动筒

承受的最大压力; $[\sigma] = \frac{\sigma_b}{n_b}$; $[\sigma]$ 为许用应力; n_b 为安全系数, 取为 5; σ_b 为缸筒材料的抗弯强度极限.

(2) 活塞杆直径约束, $D_2 \geq \sqrt{\frac{4Fn_s}{\pi\sigma_s}}$; F 为最大承载力; σ_s 为活塞杆材料的最大许用应力.

(3) 应变约束, $\epsilon_{max} \leq 0.01$; ϵ_{max} 为活塞杆最大应变.

(4) 其他设计变量采用尺寸约束条件.

2.3 优化模型

应用 1.3 中的最优化设计方法, 代入表 1 权重系数, 可建立如下优化模型:

$$F = \left(\frac{f_w}{f_{w0}}\right)^4 + \left(\frac{f_{en}}{f_{eno}}\right)^3 \quad (13)$$

式中: f_{w0} 、 f_{eno} 为优化前的质量和能耗.

以上述优化模型为目标函数, 应用优化算法进行最优求解. 将 EHA 作动系统设计参数优化问题转化为了带约束的求目标函数 F 最小值的数学问题.

3 算例验证

以某型 EHA 具体参数代入理论优化模型, 其初始参数及约束条件如表 2 所示.

表 2 EHA 初始参数及约束条件

Tab.2 Initial parameters and constraints of EHA		
变量	初始值	约束条件
L_1/mm	200	150~400
L_2/mm	400	300~600
D_1/mm	90	60~120
D_2/mm	60	40~80
D_3/mm	110	100~130
T_1/mm	8	4.83~12.00
T_2/mm	60	48~80
T_3/mm	30	20~40
T_4/mm	30	15~30
$V/(\text{mL} \cdot \text{r}^{-1})$	1	0.8~1.5

假设此 EHA 在 0.5 s 内作动 0.1 m, 由能耗函数 f_{en} 和质量函数 f_w 可得

$$f_{eno} = 50\,746 \text{ J}, f_{wo} = 19.06 \text{ kg}$$

则有

$$F = \left(\frac{f_w}{f_{w0}}\right)^4 + \left(\frac{f_{en}}{f_{eno}}\right)^3 = \left(\frac{f_w}{19.06}\right)^4 + \left(\frac{f_{en}}{50\,746}\right)^3$$

运用遗传算法对此算例进行参数优化, 遗传算法在此优化问题中的应用可理解为: 给定 EHA 作动系统中一组初始解, 在各种约束条件下, 通过目标函数来评价其优劣, 相对较劣评价值的解被抛弃, 评价值较优的解将其特征遗传至下一轮解, 直至趋向最优.

优化结果如图 5 所示. 经过 108 次迭代后, 目标函数达到最小值 0.597 7.

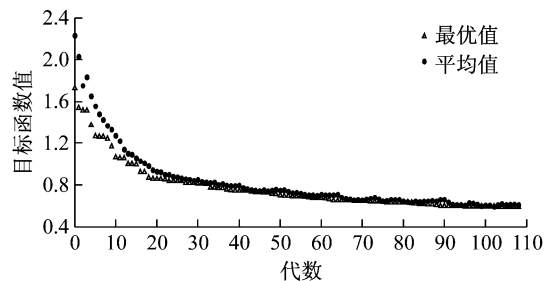


图 5 遗传算法优化结果

Fig.5 Optimization results of genetic algorithm

优化后的设计参数如表 3 所示. 此时, $f_w/19.06 = 0.764\,3$, $f_{en}/50\,746 = 0.635\,4$. 即质量减轻了 23.57%, 能耗减少了 36.46%.

表 3 优化后 EHA 参数

Tab.3 EHA optimized parameters

变量	优化值	变量	优化值
L_1/mm	183	T_1/mm	5.03
L_2/mm	448	T_2/mm	51.2
D_1/mm	84.9	T_3/mm	34.8
D_2/mm	55.2	T_4/mm	28.5
D_3/mm	119	$V/(\text{mL} \cdot \text{r}^{-1})$	1.18

4 结论

(1) 本文将 QFD 方法引入机载 EHA 作动系统设计,定义了系统的参数关系矩阵.矩阵表达了系统各特性与特征参数之间的关联程度,同时,不同意义的系统特性对系统总的评价指标采用了不同的权重系数予以表示.应用此矩阵,提出了 EHA 作动系统多目标函数最优化设计的一般思路.

(2) 针对定排量-变转速 EHA,推导了电机能耗和作动筒质量表达式,并应用上述多目标函数最优化设计方法建立了此类型 EHA 的理论优化模型.

(3) 以某型 EHA 实际优化模型为算例,应用遗传算法求解此算例最优解.结果表明,优化后质量减轻 23.57%,能耗减少 36.46%.优化结果表明该设计方法值得在 EHA 设计中推广应用.

参考文献:

[1] 沙南生,李军.功率电传机载一体化电作动系统的研究[J].北京航空航天大学学报,2004(9):909.
SHA Nansheng, LI Jun. Research on airborne power-by-wire integrated electrical actuation and control systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004(9):909.

[2] 齐海涛,付永领,郎燕.大型客机飞控作动系统配置方案设计[J].液压与气动,2014(4):19.
QI Haitao, FU Yongling, LANG Yan. Configuration design of flight control actuation systems for trunk line aircrafts[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014(4):19.

[3] 李永锋.宽体客机飞控电作动系统设计[J].航空学报,2017,38(增刊1):721531.
LI Yongfeng. Electrically powered actuation system design for long range wide body commercial aircraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017,38(Suppl.1):721531.

[4] 张谦,李兵强.一种新型电静液作动飞机刹车系统[J].测控技术,2011,30(7):79.

ZHANG Qian, LI Bingqiang. A novel electro-hydrostatic actuator for aircraft braking system [J]. Measurement & Control Technology, 2011,30(7):79.

[5] 李炜烽,成洋.电静液作动器的设计与仿真[J].测控技术,2010,29(11):59.
LI Weiyi, CHENG Yang. System design and simulation of electro-hydrostatic actuator [J]. Measurement & Control Technology, 2010,29(11):59.

[6] 刘俊,王占林,付永领,等.基于改进 HHT 的一体化电液作动器故障诊断[J].北京航空航天大学学报,2013,39(1):62.
LIU Jun, WANG Zhanlin, FU Yongling, et al. Fault diagnosis of EHA-VPVM based on improved HHT [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013,39(1):62.

[7] 金霞,段富海.基于 GO 法的电动静液作动器可靠性分析[J].大连理工大学学报,2013,53(6):846.
JIN Xia, DUAN Fuhai. Reliability analysis of electro-hydrostatic actuator based on GO methodology[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013,53(6):846.

[8] 付永领,韩旭,杨荣荣,等.电动静液作动器(EHA)设计方法综述[J].北京航空航天大学学报,2017(10):1.
FU Yongling, HAN Xu, YANG Rongrong. Review on the design of electro-hydrostatic actuator [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017(10):1.

[9] 黄泽平,姜贺,王纪森.基于负载敏感技术的新型 EHA 设计与仿真分析[J].液压气动与密封,2012,32(7):31.
HUANG Zeping, LOU He, WANG Jisen. Design and simulation analysis of a new type EHA based on load-sensing technology [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012,32(7):31.

[10] ROYSET J O, DER Kiureghian A, POLAK E. Reliability-based optimal structural design by the decoupling approach [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 73(3): 213.

[11] LI X H, JIAO L, CAO Y L, et al. Optimization design of three helical tooth star-wheel loading mechanism based on ACO[C]//Advanced Materials Research. Switzerland : Trans Tech Publications, 2011: 1348-1351.

[12] SUN C, TAN Y, ZENG J, et al. The structure optimization of main beam for bridge crane based on an improved PSO[J]. JCP, 2011, 6(8): 1585.

[13] 董锋岩.基于遗传算法悬挂式复合材料烟筒的优化设计[D].武汉:武汉理工大学,2011.
DONG Fengyan. Optimum design of handing composite chimney based on the genetic algorithm [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.

[14] HASANÇEBİ O, ÇARBAŞ S, SAKA M P. Improving the performance of simulated annealing in structural optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 41(2): 189.

[15] ANDERSSON J, KRUS P, NILSSON K. Optimization as a support for selection and design of aircraft actuation systems [J]. Optimization, 1998, 98: 39843.