气动发动机多参数多目标寻优方法

许启跃 蔡茂林 虞启辉 付向恒

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 气动发动机设计需要考虑多个参数间的耦合对性能优化的影响,且对理想功率、工作效率等多个性能指标难以建立客观的综合评价函数. 为此以发动机进气压力和进排气机构部分控制参数为设计变量进行正交设计,利用灰色关联度分析法计算贴合期望指标组合的最优参数组合,并结合参数指标趋势图,依据计算结果对参数区间进行调整,通过有限次循环得到最优设计参数. 经测试该算法快速有效,且设计参数与性能指标数量可扩展,对气动发动机的样机设计和实验具有重要的理论和工程意义.

关 键 词: 气动发动机; 多参数耦合; 多目标优化; 正交设计; 灰色关联度分析

中图分类号: TK 472

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)06-0803-05

Multi-parameter and multi-objective optimization method for air powered engine

Xu Qiyue Cai Maolin Yu Qihui Fu Xiangheng

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Designing of air powered engine concerns the impact on performance optimization by multi-parameter coupling, and it is complicated to establish the comprehensive evaluation function for multiple performance indicators such as ideal power and efficiency. Therefore the orthogonal design was carried out taking injection pressure, several controlling parameters of valve as design variables. The optimal parameter combination for the expected indicators was obtained using grey relation analysis. In accordance with parameter-indicator trends, parameters' ranges were adjusted and through finite calculation loop the best design parameter combination was obtained. The algorithm in which the number of design parameters and performance indicators is multipliable was verified to be fast and effective. A theoretical basis for air powered engine's design and experiment was formed.

Key words: air powered engine; multi-parameter coupling; multi-objective optimization; orthogonal design; grey relation analysis

目前国内外对气动发动机的研究集中在基于传统内燃机的改进设计上,尽管取得了一定的成果,但受限于工作效率、续航能力等性能指标,气动发动机距离应用还有很大差距. 其部分结构和运行参数,尤其是配气机构参数对发动机性能影响很大,这些参数的优化设计十分重要.

文献[1-2]针对若干重要的参数,如气缸程径比、进排气开启角等对气动发动机性能的影响做了定性分析和优化设计,但研究中参数分析不够全面,没有考虑参数间的耦合及多性能目标的优化. 文献[3]提出了利用非支配排序遗传算法及其改进算法的气动发动机设计方法,但该方法对三目标以上的优化不适用. 总之,目前气动发动机设计方法的研究较少,参数设定依赖主观经验.

本文提出了一种通用的气动发动机多参数多目标寻优算法,能够快速有效地找到贴合期望目

收稿日期: 2012-06-13; **网络出版时间**: 2013-05-30 16:35

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130530.1635.001.html

作者简介: 许启跃(1988-),男,安徽合肥人,博士生,meaxinlang@sina.com.

标组合的最优参数组合,为气动发动机的样机设计和实验提供有力的理论支持.

1 寻优问题分析

1.1 配气阀门参数化

基于文献[4],本研究利用 simulink 建立了气动发动机仿真模型,并对显著影响发动机性能的配气机构模型做了改进,其中进排气阀门有效开度的控制曲线如图 1 所示.

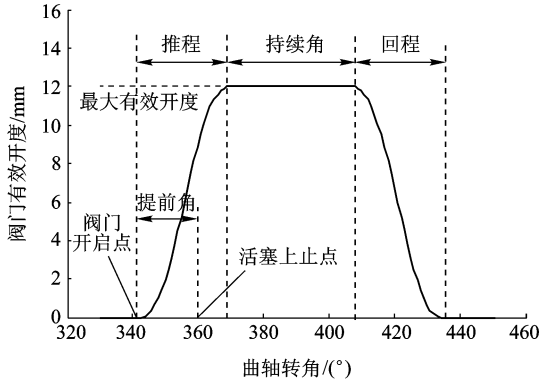


图 1 进排气门开度控制曲线

阀门推程和回程的运动方程采用动力学性能较为优良的五次多项式形式,且由图 1 中标识的参数完全确定,以便于参数化设计和调节.

结合包含上述阀门规律的 simulink 模型,本研究利用 matlab/GUI 设计了气动发动机仿真平台,可仿真发动机在不同参数下的运行结果,分析各参数变化对性能的影响规律. 本文寻优方法中发动机性能指标的计算也是基于该仿真平台.

1.2 性能指标和设计参数的选定

气动发动机较为重要的性能指标为:理想功率 P_e(kW),工作效率 η_e,耗气率 G_m(g·s^{-1});发动机工作过程产生的低温对机械运转会产生不良影响,因此平均温度 T_{av}(K)也作为优化指标. 发动机的结构参数不便更改,且由仿真分析可知,输入气体状态和配气机构参数对性能影响最为明显,因此选择进气压力 p_{in}(MPa),进气阀门的最大开度 D_{in}(mm)、提前角 ϕ_{ina}(°)、持续角 ϕ_{inl}(°),排气阀门的最大开度 D_{out}(mm)、提前角 ϕ_{outa}(°)、持续角 ϕ_{outl}(°)作为设计参数.

1.3 问题分析

利用 1.1 节中所述的仿真平台分析上述性能指标与各参数独立变化的关系规律. 仿真过程使用的气动发动机固定参数参照轻型摩托车发动机实物尺寸,固定参数值和设计参数范围如表 1 所示.

经分析可得不同性能目标与同一参数的关系曲线不相关甚至矛盾. 例如 P_e,η_e 与 p_{in}的关系如图 2 所示,可见 p_{in}值的设计不能使两个指标同时最优. 设计参数和性能指标数量增多的情况就更加复杂.

表 1 固定参数和设计参数

固定参数	取值	设计参数	取值范围
活塞行程/m	0.05	p_{in}/MPa	0.4 ~ 1.2
活塞直径/m	0.052	D_{in}/mm	5 ~ 9
气缸初始容积/m^3	3×10^{-5}	ϕ_{ina}/(°)	5 ~ 25
曲柄连杆比	0.263	ϕ_{inl}/(°)	6 ~ 46
往复质量/kg	0.143	D_{out}/mm	9 ~ 13
转速/(r·min^{-1})	1400	ϕ_{outa}/(°)	0 ~ 40
进气温度/K	293	ϕ_{outl}/(°)	84 ~ 164

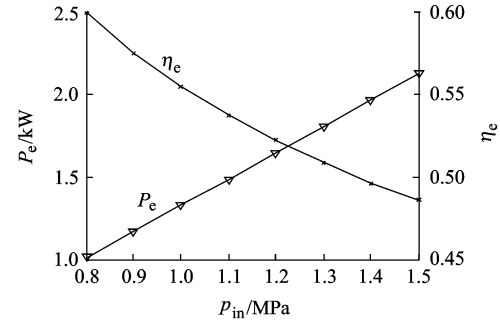


图 2 不同性能指标与 p_{in}关系

参数间的耦合尽管没有确定关系式,但也会影响性能目标的优化,如 p_{in}不同,η_e 与 ϕ_{inl}的关系曲线极值点位置产生了移动(图 3),可见 ϕ_{inl}的优化需要考虑 p_{in}大小,反之亦然. 因此气动发动机各参数对性能的影响具有交互作用,对单个参数进行独立设计是不合理的.

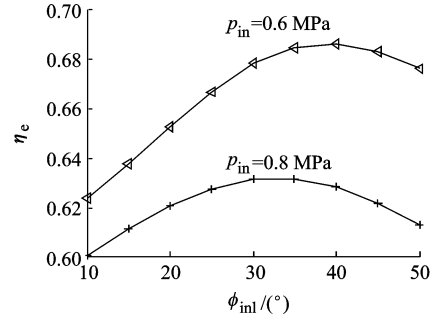


图 3 参数耦合对 η_e 最优化的影响

综上所述,气动发动机的设计是多参数多目标优化问题,应当考虑设计参数的全部变化组合,形成有效的综合评价指标.

2 正交设计与灰色关联度分析寻优

2.1 正交参数设计

只有覆盖全部组合的分析才能解决参数耦合问题,但对于气动发动机的设计参数数量,全面试

验规模庞大. 针对类似问题,正交设计[5]是从试验因素全部组合中抽取具有代表性的最小组合,以部分试验结果分析全面试验情况的方法.

本文对设计参数选取 $L_{50}(5^{11})$ 正交表,即 7 个设计参数,各参数 5 种变化值,仅 50 次仿真即可完成一次完整分析过程. 表 2 为气动发动机正交设计表的部分内容,可见试验点通过正交设计的均匀分布性和综合代表性.

表 2　气动发动机参数正交表部分内容

序号	p_{in}/MPa	D_{in}/mm	ϕ_{ina}/(°)	ϕ_{inl}/(°)	D_{out}/mm	ϕ_{outa}/(°)	ϕ_{outl}/(°)
1	0.4	5	5	20	9	0	100
2	0.4	6	10	30	10	10	120
3	0.4	7	15	40	11	20	140
4	0.4	8	20	50	12	30	160
5	0.4	9	25	60	13	40	180
6	0.6	6	15	50	9	10	140
7	0.6	7	20	60	10	20	160
8	0.6	8	25	20	11	30	180
9	0.6	9	5	30	12	40	100
10	0.6	5	10	40	13	0	120

2.2　灰色关联度分析

灰色关联度分析法[6-7]能客观地得出计算目标与期望目标最接近的参数组合,通过“关联度”的大小评价组合的优劣. 因此本研究对气动发动机采用多指标灰色关联度分析,计算过程如下.

2.2.1　计算决策矩阵并给出期望目标

利用正交设计方法得到决策方案集:

$$\boldsymbol{A}_{or} = (A_1, A_2, \cdots, A_{50})^{T} \tag{1}$$

其中,A_i 为表 2 中序号 i 组参数组合方案,而每组方案的评价指标集由 G_m, P_e, η_e, T_{av} 组成:

$$\boldsymbol{E} = (G_m, P_e, \eta_e, T_{av}) = (E_1, E_2, E_3, E_4) \tag{2}$$

$\boldsymbol{A}_{or}$ 通过分析平台仿真计算得出相应的指标值集合 $\boldsymbol{D} = (D_{ij})_{50\times4}$,即称为决策矩阵,其中 D_{ij} 为方案 A_i 下指标 E_j 的计算值,而期望指标向量 $\boldsymbol{D}_0 = (D_{01}, D_{02}, D_{03}, D_{04})$ 需依据实际情况设定较为合理的值.

2.2.2　计算灰色关联度判断矩阵

对决策矩阵进行无量纲化,得矩阵:

$$D_{dij} = D_{ij}/D_{0j} \quad i = 1,2,\cdots,50; j = 1,2,3,4 \tag{3}$$

无量纲化后指标值 D_{dij} 与对应期望指标的灰色关联系数记为 f_{ij},表示第 i 组方案 A_i 的计算值与第 j 个期望指标值 D_{0j} 的贴合程度. 对于 f_{ij} 的计算方法,本文采用最为通用的计算式:

$$f_{ij} = \frac{\min\limits_i \min\limits_j |1 - D_{dij}| + \rho \max\limits_i \max\limits_j |1 - D_{dij}|}{|1 - D_{dij}| + \rho \max\limits_i \max\limits_j |1 - D_{dij}|}$$
$$i = 1,2,\cdots,50; j = 1,2,3,4 \tag{4}$$

矩阵 $\boldsymbol{F}_r = (f_{ij})_{50\times4}$ 即灰色关联度判断矩阵.

2.2.3　设计指标权重并计算综合评价值“关联度”

指标所赋权值应当依据发动机的设计要求设定. 本文借鉴求和法赋权,两指标相比,标值范围 1 ~ 9,标值越大表示前者相对越重要. 对上述确定的 4 项发动机性能做相互比较标度,通过如表 3 所示的求和表得到气动发动机性能指标的权重.

表 3　指标权重设计

性能指标	G_m	P_e	η_e	T_{av}	$\sum_i \alpha_{ij}$	$\dfrac{\sum_i \alpha_{ij}}{\sum_j \sum_i \alpha_{ij}}$
G_m	1	1/3	1/4	1/2	2.0833	0.0929
P_e	3	1	1/2	2	6.5000	0.2900
η_e	4	2	1	3	10.0000	0.4461
T_{av}	2	1/2	1/3	1	3.8333	0.1710
$\sum_j \sum_i \alpha_{ij}$					22.4167	

由此得权重向量:

$$\boldsymbol{v} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)^{T} = (0.0929, 0.2900, 0.4461, 0.1710)^{T}$$

设计参数组合的计算目标与期望目标的关联度可通过 $\boldsymbol{F}_r$ 和 $\boldsymbol{v}$ 计算得到:

$$R_i = \sum_{j=1}^{4} f_{ij} \boldsymbol{W}_j \qquad i = 1,2,\cdots,50 \tag{5}$$

其中,$\boldsymbol{W}_j = \omega_j^2 \Big/ \sqrt{\sum_1^4 \omega_j^2}$ 称为灰色关联投影权值矢量.

根据关联度 R_i 的大小即可选择气动发动机最优参数组合,R_i 值越大,其对应方案 A_i 参数组合的计算目标值越贴合期望指标,同时可以计算出最优性能指标集 D_i,与期望指标值对比.

3　气动发动机寻优实例和方法改进

3.1　寻优程序

在本研究设计的寻优程序中输入如表 1 中所示的设计参数上下限,便可自动得出如表 2 所示的正交参数组合,并对所有组合得出计算性能指标值;表 3 所示的权重嵌于程序中,以期望性能为目标,程序按灰色关联度分析方法得出最优设计参数组合及其对应指标值. 通过调整期望目标的值,可以得出一系列不同的优化结果.

3.2　寻优结果分析

以两次典型的寻优结果为例,性能指标的期望值及其对应计算值如表 4 所示.

表 4 中的两组寻优结果对应的设计参数组合如表 5 所示.

表4 性能指标期望值和计算值

性能指标	期望值1	计算值1	期望值2	计算值2
G_m/(g·s^{-1})	10	10.2	10	12.4
P_e/kW	1.0	1.05	1.3	1.31
η_e/%	40	47	50	51.1
T_{av}/K	220	232	220	234

表5 设计参数计算值

设计参数	计算值1	计算值2
p_{in}/MPa	1	1
D_{in}/mm	7	9
ϕ_{ina}/(°)	5	5
ϕ_{inl}/(°)	36	46
D_{out}/mm	12	11
ϕ_{outa}/(°)	0	0
ϕ_{outl}/(°)	164	124

由上述结果可见,寻优方法能够很好地使计算性能指标贴近期望值,期望值2中功率和效率指标较期望值1中有所提高,计算结果也能相应提高并对部分参数做适当调整.

但若基于期望值2再将功率指标提高至1.5 kW,设计结果和参数组合没有变化,理想功率设计结果仍然是1.3 kW,这使得功率的设计结果与期望值偏差过大,寻优失效,原因分析和改进方法如下.

3.3 依据参数指标趋势图调节参数变化区间

由于单次寻优过程的参数区间固定,而正交设计法决定了每个参数变化只有有限个离散点,参数变化范围和数量有限产生了如下问题:

1)寻优参数区间选取需要依靠一定经验;

2)有限区间产生了局部最优;

3)区间过大也会使寻优精度降低.

对此,本文通过正交设计的参数指标趋势图调节参数区间:如图4所示的"指标趋势图",能够反映灰色关联度与气动发动机各设计参数的平均变化关系趋势,从中还可以分析参数的局部敏感度. 当某条参数的趋势曲线明显单调,说明参数区间偏离最优解;当某条参数曲线极差与其他曲线相比偏大,表明区间敏感度过大. 需要说明的是,"指标趋势图"本身分析仅供分析统计规律,为寻优提供参考,并不能由曲线的极值得出最优解.

例如上述寻优失效情况的"指标趋势图"(见图4),可见在给定参数范围内,p_{in},D_{out}和ϕ_{outl}的指标趋势明显单调上升,说明这些参数在所选区间内偏离了最优解,应当尝试将参数区间向右平移;且p_{in}曲线极差较其他参数偏大,说明该参数变化范围过大,影响寻优精度,应缩小参数区间.

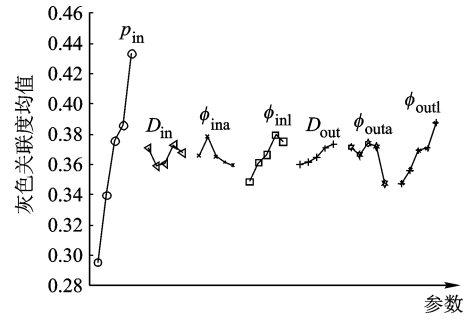


图4 失效情况的参数指标趋势图

将上述判断与区间调节引入优化程序,对期望指标设定误差容限,当计算指标值超出期望值的误差限,则自适应调整参数范围重新寻优,直到计算结果满足误差限制. 这样,初始参数区间可以较宽泛地设定,避免了依靠经验. 程序中,区间平移步长和缩小因子依据"趋势图"变化自行调整,以提高效率.

结合参数区间自适应调整的方法重新寻优,可以更宽泛地设置参数范围,如表6所示,并将期望功率和效率分别提高到1.5 kW和50%.

表6 重新设置参数区间

设计参数	范围	计算值
p_{in}/MPa	0.3~5	1.88
D_{in}/mm	5~10	7.5
ϕ_{ina}/(°)	0~30	23
ϕ_{inl}/(°)	0~170	38
D_{out}/mm	10~15	10
ϕ_{outa}/(°)	0~40	38
ϕ_{outl}/(°)	80~180	80

寻优的结果和"趋势图"如表7和图5所示.

表7 自动调整参数区间的寻优结果

性能指标	期望值	误差容限	计算值
G_m/(g·s^{-1})	10	3	12.2
P_e/kW	1.5	0.03	1.52
η_e/%	50	1	50.5
T_{av}/K	220	5	220

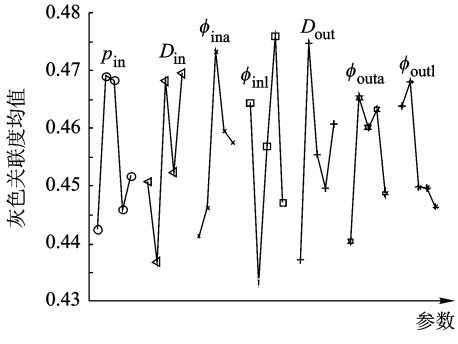


图5 参数区间调整后的趋势图

可见寻优结果优良,设计目标值都在期望目标值的误差容限范围内. 通过自动调整区间,"指标趋势图"显示参数指标趋势曲线基本都出现极

值,且敏感度相近,说明参数区间的调节方法有效,设计结果接近全局最优值.

3.4　方法小结

如上所述,本文提出的结合正交设计与灰色关联度分析的寻优方法,如图 6 所示.

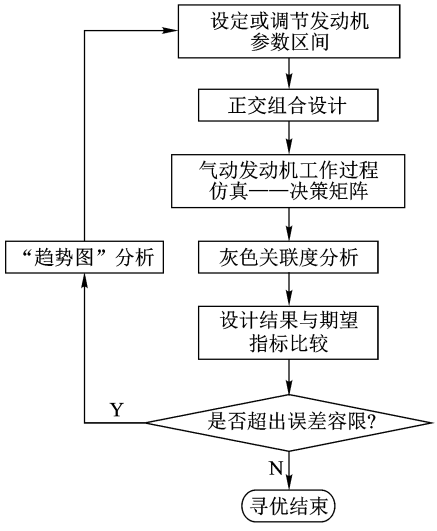


图 6　寻优方法流程

4　结　论

本文针对气动发动机多参数多目标优化问题设计了一种参数寻优方法:利用正交设计法能够高效覆盖发动机多个参数在变化区间内的所有组合;通过灰色关联度分析计算最优参数组合,可以解决气动发动机多目标优化综合评价函数难以权衡的问题;为避免由于参数区间有限导致的寻优失效,本文设计了结合正交分析的参数指标趋势图,根据寻优结果自适应地调整参数区间的改进方法,可以使优化水平和精度得到提高.

经测试该方法快速有效,宽泛地设定气动发动机设计参数的区间后,算法经有限次循环即可得出满足发动机目标性能的参数组合,计算效率高,且设计参数与性能指标数量可扩展.

参考文献(References)

[1] 刘昊,陶国良,陈鹰. 空气动力发动机气缸容积及程径比的研究[J]. 工程设计学报,2006,13(4):255-259
Liu Hao, Tao Guoliang, Chen Ying. Research on displacement and stroke-bore ratio of air powered engine [J]. Journal of Engineering Design,2006,13(4):255-259(in Chinese)

[2] 聂相虹,俞小莉,胡军强,等. 进排气开启角对气动发动机的影响及其优化设计[J]. 工程设计学报,2009,16(1):16-20
Nie Xianghong, Yu Xiaoli, Hu Junqiang, et al. Influence of inlet and outlet valve's open timing on pneumatic engine and their optimal design [J]. Journal of Engineering Design, 2009, 16(1):16-20(in Chinese)

[3] 刘林,俞小莉,胡军强,等. 用于气动发动机设计的非支配排序遗传算法的改进[J]. 浙江大学学报:工学版,2009,43(5):907-910
Liu Lin, Yu Xiaoli, Hu Junqiang, et al. Modification on non-dominated sorting genetic algorithm used for air powered engine design [J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2009,43(5):907-910(in Chinese)

[4] 刘昊. 空气发动机的探索性研究[D]. 杭州:浙江大学机械与能源工程学院,2004
Liu Hao. Research on air powered vehicle engine[D]. Zhejiang: School of Energy and Power Engineering, Zhejiang University,2004(in Chinese)

[5] Chen Jianlin, Tam Nora Fung Yee, Au Kwai Chi, et al. Using orthogonal design to determine optimal conditions for biodegradation of phenanthrene in mangrove sediment slurry [J]. Journal of Hazardous Materials,2010,176(1-3):666-671

[6] Xia X T, Li J H. Influence of vacuum on friction torque of tolling bearing for space applications based on optimum grey relational space[J]. Journal of Grey System,2011,23(4): 327-334

[7] Wei G W. GRA method for multiple attribute decision making with incomplete weight information in intuitionistic fuzzy setting [J]. Knowledge-based Systems,2010,23(3): 243-247

(编　辑:赵海容)