

基于排气压力波变化规律的两冲程发动机充气效率 多目标优化方法

Multi-Objective Optimization of the Volume Efficiency for 2-Stroke Engine Based on the Exhaust Pressure Wave Behavior

陈龙华 许敏 袁志远

(上海交通大学汽车电子控制技术国家工程实验室)

摘要: 两冲程发动机排气管路尺寸对排气压力波传播有着重要影响, 其各段长度和直径通过影响排气压力波传播与反射特性, 控制排气流出与回流, 进而影响着发动机的充气效率。本文首先在仿真分析基础上, 讨论排气管各参数对排气压力波影响机理。然后, 利用多参数优化方法, 结合遗传算法, 以充气效率为目标, 对排气管各参数进行耦合优化。并且对比单目标优化方法和权因子多目标优化方法的差异。结果证明, 采用权因子多参数多目标优化方法可以得出最佳的排气管结构。

关键词: GT-POWER 两冲程 排气管 压力波 优化

Abstract: The exhaust pipe dimension has an important effect on the exhaust pressure wave propagation for 2-stroke engine. Length and diameter of each sub-part affect the exhaust pressure expand and back, to control the exhaust flow out and back. This paper will first discuss the mechanism of this phenomena with GT-POWER simulation. Then, each parameter of the exhaust pipe will be optimized by Genetic Algorithm. Single objective and multi-objective methods are compared. Results show that weight factor based multi-objective method can find out the best exhaust pipe structure.

Key words: GT-POWER, 2-Stroke, Exhaust Pipe, Pressure Wave, Optimization

1 概述

两冲程发动机功率密度大、比重量轻等优点, 使其一直应用在诸多军用和民用场合。对两冲程发动机而言, 其进排气正时和相位控制主要是由活塞往复运动与进排气扫气口高度的配合实现的。进排气过程充气、排气气流运动方向和速度主要受缸内瞬时压力与进排气口瞬时压力差影响, 这意味着两冲程发动机充气效率和残余废气率等性能参数与进排气和缸内瞬时压力波变化规律直接相关。文献[1]利用两冲程发动机排气压力波动频谱特性, 计算分析了不同排气管结构形式对两冲程汽油机排气压力波频谱曲线振幅和峰值点的影响, 从理论上证明了五段式排气管可同时控制排气压力

脉冲的两个固有频率，并且各段不同的尺寸组合会对排气压力波频谱特性产生不同的影响效果，该影响还会随发动机转速变化。经过试验验证，证明了不同尺寸组合的排气管对同一发动机扭矩和频谱特性的影响效果非常明显。这表明，对两冲程发动机而言，排气管的设计既要考虑各段尺寸的优化，还要同时兼顾转速的影响。文献[2—6]采用理论仿真分析的方法，研究了不同类型发动机进排气压力波的变化规律，以及压力波对发动机性能的影响趋势。文献[7—8]对增压发动机排气压力波变化规律进行了试验研究，并对比了排气管结构对发动机充气性能的影响。

已有的研究充分论证了排气管结构能在一定程度上影响不同转速下两冲程发动机的进排气性能，但如何确定排气管各段尺寸，使发动机在某一转速下充气效率最优化，或者使发动机在多个转速下都能实现较高充气性能，是发动机设计初期必须要考虑的问题，关于此方面优化方法的研究鲜有报道。本文将借助仿真分析工具，首先详细探讨两冲程发动机压力波动推动进排气行为的详细机理，揭示排气管结构如何影响进排气性能；然后针对某一固定转速，将排气管各段尺寸都作为优化变量，采用先进的遗传算法，找出最大充气效率对应的排气管结构；最后考虑多个转速，采用权重系数多目标优化方法，得出能同时满足多个转速下充气效率俱佳的排气管结构。

2 优化方法

2.1 仿真分析模型

由于本文主要内容是方法论研究，所以仿真分析模型采用的是 GT-POWER 推荐的单缸两冲程发动机模型(图 1 左)，该发动机主要结构参数见表 1。排气管采用的是五段式结构(图 1 右)，L1—L5 依次是各段长度(mm)，D1 是与排气口相连的直管直径(mm)， α 是扩张管的扩张角($^{\circ}$)，D3 是与大气相通的尾管直径(mm)。这八个结构参数就是本文主要研究的优化变量。

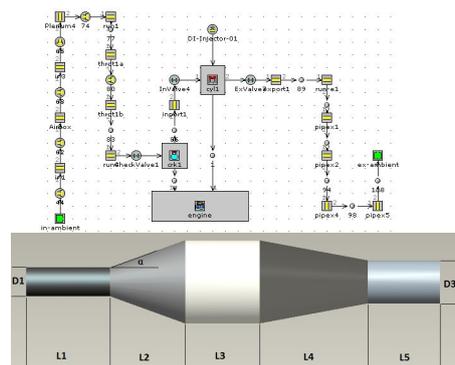


图 1 GT-POWER 计算模型和五段式排气管结构示意图

表 1 发动机结构参数

排量 /L	0.246
缸径冲程比 /—	1.094
压缩比 /—	9.6
曲轴箱增压比 /—	1.45
进气口开关角 /ATDC	IVO:123 / IVC:237
排气口开关角 /ATDC	EVO:92 / EVC:268

2.2 优化算法

发动机工作过程属于多变量多目标高度耦合的非线性问题，很难用数学公式准确描述，所以本文采用近年来被广泛研究的适用于复杂问题的遗传算法进行优化。遗传算法已经被证明是随机搜索优化算法中鲁棒性极强的方法之一。本研究在 MATLAB 遗传算法工具箱基础上进行了二次开发，将 MATLAB 与 GT-POWER 进行耦合。根据优化变量和取值范围，首先生成初始种群，代入 GT-POWER 中求解每一个种群的适应度函数值；然后根据各种群的适应度进行选择、交叉、变异等操作，生成下一代种群，再代入 GT-POWER 中求解新一代各个种群的适应度函数；如此迭代，最后根据适应度函数值的变化趋势判断是否收敛。由于求解每一代各个种群适应度函数的过程耗时最长，所以对计算程序进行了并行化改进，植入了 MATLAB 分布式并行计算 SPMD 模块，采用 8 核并行，计算速度大约提高 8 倍。遗传算法控制参数中，变量样本选择采用二进制实数编码，每个变量的样本空间为 2^{20} ，每次迭代种群数 40，最大迭代次数 70，交叉概率 0.9，变异概率 0.2。搭建好优化模型后，需要参考实际空间布置确定各变量的允许取值范围，与排气口相连的直管直径 D1 取值范围 40~60mm，扩张管扩张角 α 取值范围 10~45°，尾管直径取值范围 20~60mm，五段管长 L1~L5 取值范围都是 100~300mm。

3 结果分析

3.1 排气管结构参数对充气效率影响机理

两冲程发动机在做功膨胀行程中期，活塞下行过程中会首先打开排气口，由于燃烧过程刚刚结束，这时缸内压力远高于排气管内空气压力，燃烧废气会迅速在压差作用下流向排气管，从而在排气管内形成一个压缩波，此时排气管内压力波传播方向和气流传播方向一致，都是朝着排入大气方向。如图 2a 所示，从排气口打开(EVO)到进气口打开(IVO)的自由排气阶段，排气口处会形成一个压力波峰，在和转速相关的气流惯性作用下，该段排气压力波的振幅会随着转速升高而减小，其峰值相位也会随着转速增加而滞后。由于进气口尚未打开，所以该段压力波主要影响排气初始阶段，对进气基本没有影响。由于气流惯性会随转速变化，自由排气阶段排气量占总排气量的份额会随着转速升高而减小，如图 2b 和图 2c 所示，在 4500 转全负荷，自由排气期间会有大约一半的缸内废气会排出气缸。

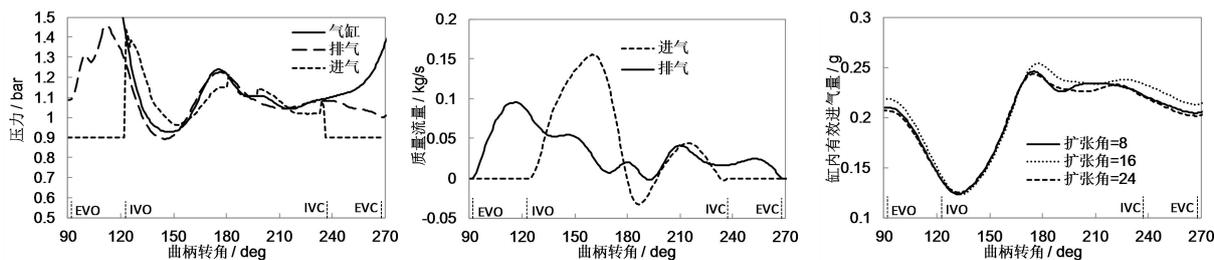
图 2a. 4500 转, 扩张角 16° 图 2b. 4500 转, 扩张角 16°

图 2c. 4500 转, 不同扩张角

活塞继续下行的过程中, 进气口被打开, 此时一直到进气口关闭 (IVC), 进排气扫气口都处于开启状态, 为强制排气阶段, 也是进气的主要时期。如图 2a 和图 2b 所示, 从 IVO 到 160degATDC , 增压后的进气充量会在相对缸内正压差作用下迅速进入气缸, 同时, 如果此时缸内压力高于排气压力, 则缸内废气会在进气推力和气缸与排气管正压差的双重作用下排向大气。由于气流速度慢于压力传播速度, 进气压力、缸内压力和排气压力在 160degATDC 左右都会达到第一个波谷, 在进气压力和气缸压力相等并即将小于气缸压力的时刻, 进气气流加速度减小至零点, 故进气质量流量在此过程中会逐渐增加并达到峰值。另外, 从图 2a 可以看出, 此时排气压力和气缸压力非常接近, 在高速工况受气流惯性作用, 该段排气压力甚至会超过气缸压力, 排气速度会迅速降低, 如果高速工况此过程排气相对气缸正压差维持较长, 则将出现废气倒流, 阻碍新鲜空气进入气缸, 进而影响充气效率和扫气效率。从 160degATDC 到下止点, 该段仍然为主要进气时间, 从图 2b 可以看出, 绝大部分新鲜进气是在 IVO 到下止点期间进入气缸的, 缸内瞬时有效进气量在下止点附近达到峰值 (图 c)。进排气扫气口有效面积在下止点达到最大, 所以进气压力、气缸压力和排气压力都在下止点附近达到一个波峰。从 160degATDC 开始, 由于缸内充气量的增加, 气缸压力升高, 进气压力小于气缸压力 (图 a), 在负压差产生的负加速度作用下, 进气速度会逐渐减小, 甚至在下止点前后还出现了进气倒流。由于此时排气口和气缸处于连通状态, 排气压力和缸内压力变化趋势相同, 并且在排气管压力反射作用下, 排气压力还会出现高于缸内压力的情况 (图 a), 虽然在气流惯性作用下仍然在排气, 但气流速度明显降低, 从图 b 可以看到, 这段期间排气口流量急剧减小甚至出现些微排气倒流情况。从下止点到 210degATDC , 活塞上行开始压缩, 进气口和排气口开启面积收缩变小, 在此作用下, 进气压力和缸内压力都会出现一个很小的压缩波峰 (图 a), 并且进气压力还会出现高于缸内压力的情况, 进气气流会在相对缸内正压差作用下进入气缸。由于缸内压力高于排气压力, 缸内新鲜进气会开始流出排气管。从 210degATDC 到 IVC 期间, 进气口接近关闭, 缸内压力在活塞压缩作用下开始升高, 进气压力小于缸内压力, 进气气流速度会逐渐减小至零。排气压力会在排气管反射压力波的作用下缓慢升高, 缸内新鲜进气流出排气管的速度会减慢。IVC 到 EVC 期间, 缸内压力大于排气压力, 排气流速增加, 新鲜进气会进一步流出排气管, 从而减小充气效率。

根据以上分析，排气管对进排气过程压力波动的影响主要体现在两个方面。首先是废气排出过程，从 EVO 开始到接近下止点。排气口打开后，排气管扩张段的设计会影响自由排气阶段排气压力波频谱特性，该阶段要使排气压力小于缸内压力，特别是 IVO 到第一个压力波谷期间，要通过优化扩张管的尺寸，避免排气压力高于缸内压力的情况，否则会增加缸内残余废气率并阻碍进气。从图 2c 可见，16° 扩张角排气管的进气量明显大于 8° 和 24° 扩张角的两个排气管的进气量，并且在自由排气阶段，16° 扩张角的排气管能在自由排气阶段排出更多的废气。其次是新鲜进气排出过程，从下止点开始到 EVC，这段时间内，排气管收缩段对排气压力的反射效应开始显现，通过匹配优化收缩段和扩张段结构参数，让收缩段反射回来的压力波通过扩张段进行压缩，使排气压力尽可能接近甚至超过缸内压力，则会减小新鲜进气的流失量，如果优化效果明显，还会利用这一反射波使进入排气管的新鲜进气流回气缸。

3.2 考虑单一转速的单目标优化

对于发电、增程等 APU(辅助动力单元)应用场合，发动机一般运行在某个固定工况点，此时发动机的设计和优化将主要围绕该运行工况点进行。充气效率是衡量发动机进排气过程性能好坏的关键参数，对两冲程发动机而言，从前述进排气过程分析可知，充气效率高则意味着残余废气系数低，因而扫气效率高。本文以充气效率作为两冲程发动机排气管结构优化的目标。选取 3000 转、4500 转和 6000 转全负荷作为发动机的代表工况，分别研究以某一固定转速充气效率为目标时的排气管结构组合，并验证该排气管在其他转速下的充气性能。

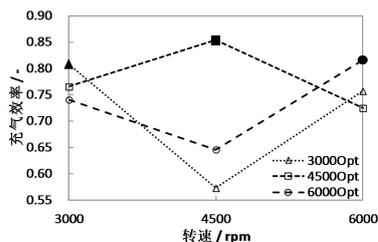


图 3a 单目标优化的目标结果

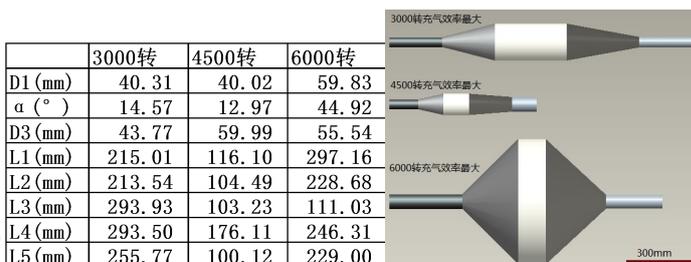


图 3b 单目标优化的变量结果

在进行单目标优化时，遗传算法适应度函数为充气效率，优化目标是充气效率最大化。图 3 是收敛后的优化结果，图 3a 中实心点是各转速下充气效率最优化结果，而同一条线上的其他空心点是利用当前充气效率最优化时的排气管结构校核其他转速的结果；图 3b 是各个转速下充气效率分别达到最优时所需的排气管各段详细尺寸和结构图。从图 3a 中可以明显看出，以某个单一转速充气效率最优化为目标时，得出的变量即排气管各段结构组合只对应于该转速下的最优解，如果将该转速下最优化时的变量取值应用于其他转速，则得出的其他转速下充气效率结果将与该转速所能达到的最

大充气效率相差甚远。特别在 4500 转时，最大充气效率为 0.853，如果将 3000 转充气效率最大时的排气管应用在 4500 转，则充气效率为 0.573，与 4500 转最大充气效率相差 32.8%；同样，如果将 6000 转充气效率最大时的排气管应用在 4500 转，则充气效率为 0.646，与 4500 转最大充气效率相差 24.3%。这证明了，遗传算法的多变量单目标优化方法非常适用于两冲程发动机排气管结构优化。

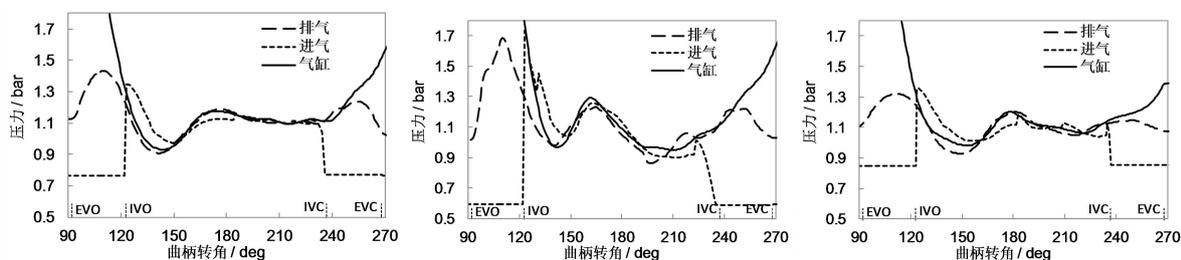


图 4a 使用 3000 转排气管 图 4b 使用 4500 转排气管 图 4c 使用 6000 转排气管

图 4 是在 4500 转全负荷工况下使用三种排气管得出的进排气和气缸压力曲线，这三种排气管分别是 3000 转充气效率最优化时的排气管(管 A)、4500 转充气效率最优化时的排气管(管 B)、6000 转充气效率最优化时的排气管(管 C)。在 IVO 到下止点的主要进气阶段，管 B 的进气压力基本都高于气缸压力，可以实现连续进气，虽然在 165degATDC 前后气缸压力会轻微高于进气压力，但由于时期较短，只会减小进气流速，但仍然保持进气而不至于产生进气回流；而管 A 和管 C 的进气压力在 160degATDC 左右都开始显著低于气缸压力，这会明显减小进气流速，从下止点开始，由于管 A 和管 C 的进气较长时期处于相对气缸负压差状态，都会产生进气回流，负压差更显著的管 C 在这一阶段进气回流量最大；在下止点到 IVC 的进气后期阶段，管 B 的进气压力在 190degATDC 开始低于气缸压力，进气流速开始减小，由于之前一直保持高速进气状态，虽然这时进气相对气缸负压差比较显著，但只是在后期(220degATDC)进气流速减至零开始才出现进气回流，而管 A 和管 C 从 160degATDC 开始一直到 190degATDC，进气压力才接近并开始超过气缸压力，进气回流速度开始减小，由于管 A 在此期间进气压力即使高于气缸压力，其正压差也不明显，所以管 A 在下止点开始进气基本处于回流状态，管 C 在 210degATDC 前后进气压力会有一个短暂的波峰，可以在进气尾期消除进气回流并产生一部分正向进气流入气缸。

从自由排气阶段压力波动曲线可见，管 B(图 4b)在 IVO 时刻气缸压力相对排气压力的正压差要明显高于管 A 和管 C，所以管 B 在自由排气阶段排气量会大于其他排气管的排气量。对于强制排气过程，管 A 和管 C 的排气压力基本不超过气缸压力，管 C 在 150degATDC 前后排气相对气缸负压更显著，所以管 C 在强制排气阶段排气量大于管 A 的排气量；管 A 在 IVC 之后出现排气压力略高于气缸压力并产生轻微排气倒流，管 C 在 IVC 之前出现轻微排气倒流，两者在此期间由排气管回入气缸的空气量相当，由于管 C 在进气尾期的额外进气量，所以管 C 充气效率大于管 A；管 B 在 140degATDC 左右

出现排气压力高于气缸压力进而减小排气速度的现象，由于排气相对气缸正压差时期较长，在 150degATDC 甚至出现了排气倒流，但在此之后一直到大约 210degATDC，排气压力都小于气缸压力，缸内废气和后期的新鲜进气会排出气缸，从 210degATDC 开始，管 B 排气压力出现再次高于气缸压力的情况，压差显著，持续时间长，所以会在 IVC 前后产生明显的排气倒流，从而增加有效进气量。所以，综合进气、排气和排气倒流等过程，管 B 的有效进气量远超过管 A 和管 C 的有效进气量，因而管 B 的充气效率最大。

3.3 兼顾不同转速的多目标优化

如果两冲程发动机直接作为动力驱动单元，则往往会面临运行工况复杂、工作转速多变的设计要求，这时如果只考虑单一转速进行优化，则很有可能会出现发动机在偏离该转速的其他工况性能较差的情况。因此，兼顾整个转速范围，使多个转速发动机性能俱佳的多目标优化就显得非常迫切。常用的多参数多目标优化方法一般有权重系数法和 Pareto 法，本研究采用权重系数法，以 3000 转、4500 转和 6000 转充气效率同时最大化为优化目标，优化变量仍然是排气管的 8 个结构尺寸。在遗传算法优化程序编制过程中，和前述单目标优化方法不同之处主要是程序运行过程和适应度函数的表达方式。

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^n [a_i \cdot (y_i - y_{i,max})^2]} \quad (1)$$

式 1 是本研究采用的权重系数法多目标优化适应度函数。其中， f 是适应度函数值， n 表示目标个数， a_i 是各个目标的权重系数， y_i 是每个种群的目标值， $y_{i,max}$ 是只考虑这一个单目标时的最优解。在本研究中，目标个数 $n=3$ ，权重系数考虑了 4 种组合进行比较(如图 5 所示，1-1-1 表示 3000 转、4500 转和 6000 转三个优化目标的权重系数比为 1:1:1)， y_i 为不同转速下的充气效率， $y_{i,max}$ 是前面单目标优化时求出的不同转速下所能达到的最大充气效率(3000 转时 $y_{1,max} = 0.808$ ，4500 转时 $y_{2,max} = 0.853$ ，6000 转时 $y_{3,max} = 0.816$)。

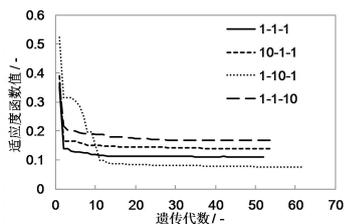


图 5a 收敛过程

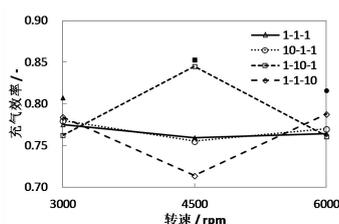


图 5b 优化结果

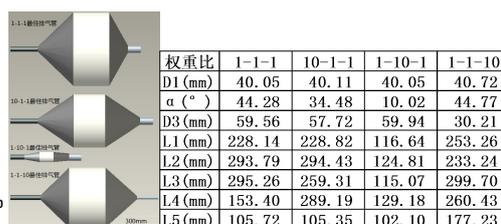


图 5c 不同权重组合下最佳排气管

从权重系数法遗传算法多目标优化收敛过程(图 5a)可以看出，四种权重组合都能在遗传 20 代以

内搜索到最优解，这表明本研究所用的多目标优化方法适用于两冲程发动机排气管结构优化。图 5b 的优化结果明显反应了权重系数对多目标优化结果的影响，图中实心点为不同转速下单目标优化结果，可见由于多目标优化时进行了兼顾折衷考虑，所以三个转速下多目标优化得出的最佳充气效率都小于各转速下单目标优化时的最大充气效率。不同权重系数组合得出的优化结果之间存在非常显著的差异，这是因为如果某一权重系数占总权重系数比例越大，则其对适应度函数影响程度越大，遗传算法在搜索时将会优先考虑权重系数份额大的目标。这一点可以从优化结果中得到论证，例如当权重系数比为 1:10:1 时，表示 4500 转的充气效率为主要优化目标，同时兼顾 3000 转和 6000 转充气效率，所以该权重系数下得出的 4500 转最大充气效率要明显大于其他任何权重系数下 4500 转的最大充气效率。根据四种权重系数优化结果对比，如果要同时兼顾这三个转速的充气性能，则权重系数比为 1:10:1 是相对比较好的方案，虽然 3000 转和 6000 转充气效率比各自为主要优化目标时充气效率低，但这两个转速的充气效率损失明显小于其他权重系数下 4500 转充气效率的损失，所以可以保证整个转速范围内充气效率损失最小。这也可以从不同权重系数组合优化出的排气管结构进行选择，权重系数比为 1:10:1 的最佳排气管尺寸相对最为合理，其他权重系数组合最佳排气管的扩张角都明显偏大，实际产品设计和布置时较难实现。

4 结语

两冲程发动机排气管路尺寸对排气压力波传播有着重要影响。排气管对进排气过程压力波动的影响主要体现在两个方面。首先是废气排出过程，该阶段要使排气压力小于缸内压力，特别是 IVO 到第一个压力波谷期间，要通过优化扩张管的尺寸，避免排气压力高于缸内压力的情况，否则会增加缸内残余废气率并阻碍进气。其次是新鲜进气排出过程，排气管收缩段对排气压力的反射效应开始显现，通过匹配优化收缩段和扩张段结构参数，让收缩段反射回来的压力波通过扩张段进行压缩，使排气压力尽可能接近甚至超过缸内压力，则会减小新鲜进气的流失量，甚至利用这一反射波使进入排气管的新鲜进气流回气缸。

在此基础上，运用遗传算法，将排气管各段长度、扩张角等作为变量。首先以单个转速充气效率为目标，优化出了满足单个转速充气性能最大时排气管尺寸。但是，单目标优化结果只能满足该转速性能最佳，其他转速性能最大会相差 24.3%。然后采用权重系数多目标优化算法，对比了四种权重时的最优排气管尺寸，得到了能同时兼顾各转速充气效率都较高的排气管结构。结果发现，权重系数比为 1:10:1 的最佳排气管尺寸相对最为合理。

5 致谢

感谢艾迪捷信息科技(上海)有限公司 GT-POWER 软件和技术支持。

参考文献

1. 李建文。单缸二冲程汽油机排气管结构形式与参数对排气压力频谱的影响。内燃机学报, 1992, 10(3)
2. 耿爱农, 罗光缉。小型二冲程汽油机排气压力波的计算。广西大学学报, 1995, 20(4)
3. 王长林。进排气系统压力波模拟计算的发展。内燃机工程, 1999, 4
4. 张砾, 邓康耀, 邬静川, 朱义伦。涡轮增压柴油机利用进排气管压力波动的废气再循环系统计算。上海交通大学学报, 2001, 35(5)
5. 高文志, 宋崇林, 冯敬奇。增压柴油机进-排气管压力波动计算与分析。农业机械学报, 2002, 33(2)
6. 王兴海, 谢和宁, 宁智。排气压力波对柴油机性能影响的分析。柴油机, 2007, 29(5)
7. 杜巍, 刘福水, 李志杰。增压柴油机排气压力变化规律的实验研究。北京理工大学学报, 2009, 29(1)
8. 朱骏, 王绍明, 崔毅, 张有, 杨卫东, 黎程。增压 6 缸柴油机排气压力波变化规律的试验研究。内燃机工程, 2011, 32(2)