



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111339686 A

(43)申请公布日 2020.06.26

(21)申请号 202010225370.0

(22)申请日 2020.03.26

(71)申请人 西北工业大学

地址 710000 陕西省西安市友谊西路127号

(72)发明人 吴锋 高丽敏 刘涛 冯旭栋

(74)专利代理机构 北京正阳理工知识产权代理

事务所(普通合伙) 11639

代理人 鄂晓楠

(51)Int.Cl.

G06F 30/20(2020.01)

G06F 111/10(2020.01)

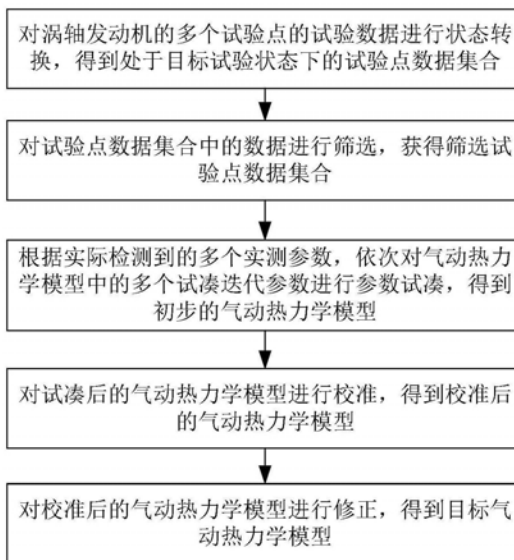
权利要求书3页 说明书9页 附图5页

(54)发明名称

一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法

(57)摘要

本发明公开的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,属于航空发动机领域。本发明实现方法为:通过对涡轴发动机的多个试验点的试验数据进行状态转换,得到处于目标试验状态下的试验点数据集合;对试验点数据集合中的数据进行筛选,获得筛选试验点数据集合;根据多个实测参数,依次对多个试凑迭代参数进行参数试凑,得到初步的涡轴发动机模型;调整通用部件特性,结合节流试验数据对初步的涡轴发动机模型进行校准;对校准后的涡轴发动机模型进行雷诺数和间隙修正,得到目标涡轴发动机模型。本发明直接利用试验数据、无需依赖部件试验特性,能够在很短的时间内完成模型构建,并保持高精度。本发明具有操作简单、适用性强的优点。



1. 一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,其特征在于:包括如下步骤,

步骤1:对涡轴发动机试验数据进行分析及处理;利用涡轴发动机不同节流状态下相同参数的连续性检查,排查数据中的坏点;换算空气流量、燃气涡轮转速至国际标准大气海平面状态、换算其余截面参数至统一的试验状态;

步骤2:为了保证逆向构建涡轴发动机模型的精度,选取发动机试验状态点;发动机试验状态点选取方法为:采用雷诺数指数筛选选取试验点数据,确保试验数据单纯反应发动机内部的气动热力匹配关系,消除雷诺数影响;通过发动机状态筛选选取高状态的试验数据,确保选取作为热力初步的数学模型的试验点具有较高的工作状态,发动机处于较高的负荷,传感器处于较高精度的测量区间,所测得的各项参数相对误差较小;采用节流状态筛选选取节流状态多的试验点,确保在后续逆向构建涡轴发动机模型校准时具有较多的可用数据,数据越多,对于后续逆向构建涡轴发动机模型最终的精度越有利;

步骤3、利用步骤2选取的发动机试验状态点试验数据,通过参数迭代试凑建立初步的涡轴发动机模型;

步骤4:利用步骤3建立的初步的涡轴发动机模型和节流状态试验数据,通过调整通用部件特性,对模型的进行校准,得到校准后部件特性和涡轴发动机模型,构建基于试验数据的涡轴发动机模型;通用部件特性调整方法包括效率调整法、转速调整法、共同工作线调整法;

步骤5、利用步骤4校准后的部件特性,结合全包线误差信息的修正方法对步骤4构建的基于试验数据的涡轴发动机逆向构建模型进行修正,进一步提高模型精度,得到目标模型;全包线误差信息的修正方法包括雷诺数修正方法、间隙修正方法。

2. 如权利要求1所述的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,其特征在于:还包括步骤6,根据步骤5中目标模型,提升涡轴发动机试验评估中模型的精度,提高涡轴发动机性能预测精度,提升试验采集数据有效性辨识度,提高试验高空性能评估精度,在工程应用中解决涡轴发动机相关工程问题。

3. 如权利要求1或2所述的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,其特征在于:步骤1实现方法为,

利用资料辅助进行试验数据的初步确认,分析预估计各部件的设计指标参数;利用发动机不同节流状态下相同参数的连续性检查,排查数据中的坏点;换算空气流量、燃气涡轮转速至国际标准大气海平面状态、换算其余截面参数至统一的试验状态;

所述资料辅助包括试验测试测点布局、航空发动机结构剖面、设计报告、说明书。

4. 如权利要求3所述的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,其特征在于:步骤2实现方法为,

步骤2.1:采用雷诺数指数筛选选取试验点数据,确保试验数据单纯反应发动机内部的气动热力匹配关系,消除雷诺数影响;

对步骤1中涡轴发动机试验数据进行雷诺数指数筛选,选取其中RNI指数大于预设筛选阈值作为待选试验点集合1,进而确保试验数据单纯反应发动机内部的气动热力匹配关系,消除雷诺数影响;所述RNI指数通过式(1)计算;

$$RNI = \frac{P_t}{P_{t_{ref}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{ref} \cdot T_{t_{ref}}}{R \cdot T_t}} \cdot \frac{\mu_{ref}}{\mu} > \text{预设筛选阈值} \quad (1)$$

其中： RNI 雷诺数指数、 P_t 为当前试验点进气总压、 $P_{t_{ref}}$ 为参考总压、 R_{ref} 为参考气体常数、 R 为试验点气体常数、 $T_{t_{ref}}$ 为参考总温、 T_t 为当前试验点进气总温、 μ_{ref} 为参考气体动力粘度、 μ 为试验点气体动力粘度；

步骤2.2:通过发动机状态筛选选取高状态的试验数据,确保选取试验点具有较高的工作状态,发动机处于较高的负荷,传感器处于较高精度的测量区间,所测得的各项参数相对误差较小;

对步骤2.1中涡轴发动机试验数据进行发动机状态筛选,选取燃气涡轮相对换算转速大于预设筛选阈值的试验点集合2,确保选取作为热力初步的数学模型的试验点具有较高的工作状态,发动机处于较高的负荷,传感器处于较高精度的测量区间,所测得的各项参数相对误差较小;所述燃气涡轮相对换算转速通过式(2)计算;

$$\frac{N_{1cor}}{N_{1,ISA,SLS,1.0}} > \text{预设筛选阈值} \quad (2)$$

其中： N_{1cor} 燃气涡轮换算转速， $N_{1,ISA,SLS,1.0}$ 为设计转速；

步骤2.3:采用节流状态筛选选取节流状态多的试验点,确保在后续逆向构建涡轴发动机模型校准时具有较多的可用数据,数据越多,对于后续逆向构建涡轴发动机数学模型最终的精度越有利;

对步骤2.2中涡轴发动机试验数据进行发动机节流状态筛选,选取节流状态较多的试验点集合3,在后续逆向构建涡轴发动机模型校准时具有较多的可用数据,数据越多,对于后续逆向构建涡轴发动机模型最终的精度越有利。

5.如权利要求4所述的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,其特征在于:步骤3实现方法为,

对步骤2选取的发动机试验状态点试验数据匹配顺序,依次对所述气动热力学模型中的多个试凑迭代参数进行参数试凑,得到初步的涡轴发动机模型,。

6.如权利要求5所述的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,其特征在于:步骤3中按照换算空气流量、燃烧室出口温度、压气机、动力涡轮部件的先后顺序开展模型可调参数迭代试凑,具体实现方法如下:

根据实测物理空气流量,对所述气动热力学模型中的进口换算空气流量进行试凑;

根据实测燃油流量,对所述气动热力学模型中的燃烧室出口温度进行试凑;

根据实测压气机出口温度,对所述气动热力学模型中的压气机效率进行试凑;

根据实测轴功率,对所述气动热力学模型中的动力涡轮效率进行试凑;

依次试凑成功后,得到初步的涡轴发动机模型。

7.如权利要求6所述的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,其特征在于:步骤4实现方法为,

基于步骤3建立的初步的涡轴发动机模型,按照级数、总压比、流量选取部件特性,对节流状态进行校准,得到校准后部件特性;通用部件特性调整方法包括效率调整法、转速调整法、共同工作线调整法;效率调整方法,参照试验实测节流状态效率分布进行所选取部件特性的效率平移调整,调整时保持循环参考点不变;转速调整方法,按照转速平移的方法进行部件特性中转速的调整,调整时,部件转速线位置不变,只改变对应的转速数值;部件共同工作线调整,按照试验实测的压气机压比-空气流量关系进行可变几何调整,在不同转速下

进行共同工作线的上下调整;即实现通用部件特性调整方法对节流状态进行校准,得到校准后部件特性,利用得到校准后部件特性,构建基于试验数据的涡轴发动机逆向构建模型。

8.如权利要求7所述的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,其特征在于:步骤5实现方法为,

利用步骤4校准后的部件特性,结合全包线误差信息的修正方法对步骤4构建的基于试验数据的涡轴发动机逆向构建模型进行修正,进一步提高模型精度;在进一步提高基于试验数据的涡轴发动机逆向构建模型精度前定义总体参数、压力参数的模型试验偏差为相对误差,定义温度的模型试验偏差为绝对误差。

9.如权利要求8所述的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,其特征在于:全包线误差信息的修正方法包括雷诺数修正方法、间隙修正方法;

雷诺数修正方法为:观察各点的误差随发动机进口压力的分布关系,如果误差大小与压力分布呈现明显的相关性,且低进口压力条件下呈现出耗油率参数低于试验值的情况时,则引入雷诺数修正,在发动机进口压力较低时适当降低压缩部件的效率,降低的幅度按照经验并结合全包线误差的分布改善情况而定;

间隙修正方法为:观察各点的误差随发动机进口温度的分布关系,如果误差随温度高低呈现明显的相关性,则引入间隙修正,具体对气动热力循环程序中设计叶片顶端间隙修正的修正量进行调整,调整的幅度按照经验并结合全包线误差的分布改善情况而定。

一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种涡轴发动机气动热力模型构建方法,尤其涉及一种基于试验数据的涡轴发动机逆向模型构建方法,适用于仅有涡轴发动机整机试验数据、没有发动机部件试验特性时的发动机模型构建,并进行涡轴发动机气动热力性能预测,属于航空发动机领域。

背景技术

[0002] 航空发动机数学模型是评估和预测航空发动机在不同飞行状态下使用性能的重要工具,在航空发动机研制过程中应用广泛。

[0003] 一般情况下构建航空发动机数学模型要依赖于大量的部件试验特性作为支撑。在此基础上,对部件特性按流量、压比等参数进行比例调整。然后根据整机条件下的流量连续方程、能量守恒方程、功率平衡方程、转速匹配等准则,在压气机、涡轮、燃烧室等部件特性中试给参数并迭代直至以上准则同时达成,得到模型预测值。将以上过程重复进行,直至所得到的数学模型预测值与试验值偏差满足一定精度。这种基于部件试验特性的发动机数学模型构建称为正向建模。该方法依赖于数量庞大的部件试验特性才能建立,且所建立的模型误差大、精度低。

[0004] 构建不依赖部件试验特性的航空发动机数学模型,提升模型仿真精度,是目前发动机性能分析的前沿。

发明内容

[0005] 本发明公开的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法要解决的技术问题是:在没有涡轴发动机具体部件特性的情况下,完全由发动机试验时获取的高空性能数据作为建模资源,提供一种直接利用试验数据并且无需依赖部件试验特性的涡轴发动机逆向建模方法,构建航空涡轴发动机模型,提升涡轴发动机试验评估中模型的精度和效率,进而提高试验高空性能评估精度。本发明具有操作简单、适用性强的优点。本发明在对发动机试验数据有效性、发动机性能的评估等方面有重要意义,解决涡轴发动机相关工程问题。

[0006] 本发明的目的是通过下述技术方案实现的:

[0007] 本发明公开的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,通过对涡轴发动机的多个试验点的试验数据进行状态转换,得到处于目标试验状态下的试验点数据集合;对试验点数据集合中的数据进行筛选,获得筛选试验点数据集合;根据多个实测参数,依次对多个试凑迭代参数进行参数试凑,得到初步的涡轴发动机模型;调整通用部件特性,结合节流试验数据对初步的涡轴发动机模型进行校准;对校准后的涡轴发动机模型进行雷诺数和间隙修正,得到目标涡轴发动机模型。本发明直接利用试验数据、无需依赖部件试验特性,能够在很短的时间内完成模型构建,并保持高精度。本发明具有操作简单、适用性强的优点。

[0008] 本发明公开的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,包括如下步骤:

[0009] 步骤1:对涡轴发动机试验数据进行分析及处理。利用涡轴发动机不同节流状态下相同参数的连续性检查,排查数据中的坏点;换算空气流量、燃气涡轮转速至国际标准大气海平面状态、换算其余截面参数至统一的试验状态。

[0010] 利用资料辅助进行试验数据的初步确认,分析预估计各部件的设计指标参数。利用发动机不同节流状态下相同参数的连续性检查,排查数据中的坏点;换算空气流量、燃气涡轮转速至国际标准大气海平面状态、换算其余截面参数至统一的试验状态。

[0011] 所述资料辅助包括试验测试测点布局、航空发动机结构剖面、设计报告、说明书。

[0012] 步骤2:为了保证逆向构建涡轴发动机模型的精度,选取发动机试验状态点。发动机试验状态点选取方法为:采用雷诺数指数筛选选取试验点数据,确保试验数据单纯反应发动机内部的气动热力匹配关系,消除雷诺数影响;通过发动机状态筛选选取高状态的试验数据,确保选取作为热力初步的数学模型的试验点具有较高的工作状态,发动机处于较高的负荷,传感器处于较高精度的测量区间,所测得的各项参数相对误差较小。采用节流状态筛选选取节流状态多的试验点,确保在后续逆向构建涡轴发动机模型校准时具有较多的可用数据,数据越多,对于后续逆向构建涡轴发动机模型最终的精度越有利。

[0013] 步骤2.1:采用雷诺数指数筛选选取试验点数据,确保试验数据单纯反应发动机内部的气动热力匹配关系,消除雷诺数影响。

[0014] 对步骤1中涡轴发动机试验数据进行雷诺数指数筛选,选取其中RNI指数大于预设筛选阈值作为待选试验点集合1,进而确保试验数据单纯反应发动机内部的气动热力匹配关系,消除雷诺数影响。所述RNI指数通过式(1)计算。

$$[0015] \quad RNI = \frac{Pt}{Pt_{ref}} \cdot \sqrt{\frac{R_{ref} \cdot T_{t_{ref}}}{R \cdot T_t} \cdot \frac{\mu_{ref}}{\mu}} > \text{预设筛选阈值} \quad (1)$$

[0016] 其中:RNI雷诺数指数、Pt为当前试验点进气总压、 Pt_{ref} 为参考总压、 R_{ref} 为参考气体常数、R为试验点气体常数、 $T_{t_{ref}}$ 为参考总温、 T_t 为当前试验点进气总温、 μ_{ref} 为参考气体动力粘度、 μ 为试验点气体动力粘度。

[0017] 步骤2.2:通过发动机状态筛选选取高状态的试验数据,确保选取试验点具有较高的工作状态,发动机处于较高的负荷,传感器处于较高精度的测量区间,所测得的各项参数相对误差较小。

[0018] 对步骤2.1中涡轴发动机试验数据进行发动机状态筛选,选取燃气涡轮相对换算转速大于预设筛选阈值的试验点集合2,确保选取作为热力初步的数学模型的试验点具有较高的工作状态,发动机处于较高的负荷,传感器处于较高精度的测量区间,所测得的各项参数相对误差较小。所述燃气涡轮相对换算转速通过式(2)计算。

$$[0019] \quad \frac{N_{1cor}}{N_{1,ISA,SLS,1.0}} > \text{预设筛选阈值} \quad (2)$$

[0020] 其中: N_{1cor} 燃气涡轮换算转速, $N_{1,ISA,SLS,1.0}$ 为设计转速。

[0021] 步骤2.3:采用节流状态筛选选取节流状态多的试验点,确保在后续逆向构建涡轴发动机模型校准时具有较多的可用数据,数据越多,对于后续逆向构建涡轴发动机数学模型最终的精度越有利。

[0022] 对步骤2.2中涡轴发动机试验数据进行发动机节流状态筛选,选取节流状态较多的试验点集合3,在后续逆向构建涡轴发动机模型校准时具有较多的可用数据,数据越多,

对于后续逆向构建涡轴发动机模型最终的精度越有利。

[0023] 步骤3:利用步骤2选取的发动机试验状态点试验数据,通过参数迭代试凑建立初步的涡轴发动机模型。

[0024] 利用步骤2选取的发动机试验状态点试验数据,依次对所述气动热力学模型中的多个试凑迭代参数进行参数试凑,得到初步的涡轴发动机模型,包括:

[0025] 根据实测物理空气流量,对所述气动热力学模型中的进口换算空气流量进行试凑;

[0026] 根据实测燃油流量,对所述气动热力学模型中的燃烧室出口温度进行试凑;

[0027] 根据实测压气机出口温度,对所述气动热力学模型中的压气机效率进行试凑;

[0028] 根据实测轴功率,对所述气动热力学模型中的动力涡轮效率进行试凑;

[0029] 依次试凑成功后,得到初步的涡轴发动机模型。

[0030] 步骤4:利用步骤3建立的初步的涡轴发动机模型和节流状态试验数据,通过调整通用部件特性,对模型的进行校准,得到校准后部件特性和涡轴发动机模型,构建基于试验数据的涡轴发动机模型。通用部件特性调整方法包括效率调整法、转速调整法、共同工作线调整法。

[0031] 基于步骤3建立的初步的涡轴发动机模型,按照级数、总压比、流量选取部件特性,对节流状态进行校准,得到校准后部件特性。通用部件特性调整方法包括效率调整法、转速调整法、可变调整法。效率调整方法,参照试验实测节流状态效率分布进行所选取部件特性的效率平移调整,调整时保持循环参考点不变;转速调整方法,按照转速平移的方法进行部件特性中转速的调整,调整时,部件转速线位置不变,只改变对应的转速数值;部件共同工作线调整,按照试验实测的压气机压比-空气流量关系进行可变几何调整,在不同转速下进行共同工作线的上下调整。即实现通用部件特性调整方法对节流状态进行校准,得到校准后部件特性,利用得到校准后部件特性,构建基于试验数据的涡轴发动机逆向构建模型。

[0032] 步骤5、利用步骤4校准后的部件特性,结合全包线误差信息的修正方法对步骤4构建的基于试验数据的涡轴发动机逆向构建模型进行修正,进一步提高模型精度,得到目标模型。全包线误差信息的修正方法包括雷诺数修正方法、间隙修正方法。

[0033] 利用步骤4校准后的部件特性,结合全包线误差信息的修正方法对步骤4构建的基于试验数据的涡轴发动机逆向构建模型进行修正,进一步提高模型精度。在进一步提高基于试验数据的涡轴发动机逆向构建模型精度前定义总体参数、压力参数的模型试验偏差为相对误差,定义温度的模型试验偏差为绝对误差。全包线误差信息的修正方法包括雷诺数修正方法、间隙修正方法。

[0034] 雷诺数修正方法为:观察各点的误差随发动机进口压力的分布关系,如果误差大小与压力分布呈现明显的相关性,且低进口压力条件下呈现出耗油率参数低于试验值的情况时,则引入雷诺数修正,在发动机进口压力较低时适当降低压缩部件的效率,降低的幅度按照经验并结合全包线误差的分布改善情况而定。

[0035] 间隙修正方法为:观察各点的误差随发动机进口温度的分布关系,如果误差随温度高低呈现明显的相关性,则引入间隙修正,具体对气动热力循环程序中设计叶片顶端间隙修正的修正量进行调整,调整的幅度按照经验并结合全包线误差的分布改善情况而定。

[0036] 还包括步骤6:根据步骤5中目标模型,提升涡轴发动机试验评估中模型的精度,提

高涡轴发动机性能预测精度,提升试验采集数据有效性辨识率,提高试验高空性能评估精度,在工程应用中解决涡轴发动机相关工程问题。

[0037] 作为优选,步骤5中基于试验数据的涡轴发动机逆向构建模型,在涡轴发动机全包线范围内主要性能参数仿真误差由5%左右提升至1%以内,能够大幅提升涡轴发动机性能预测水平,也能够用于对试验测试数据有效性进行判别,解决涡轴发动机应用领域相关工程问题。

[0038] 有益效果:

[0039] 1、本发明公开的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,通过对涡轴发动机的多个试验点的试验数据进行状态转换,得到处于目标试验状态下的试验点数据集合;对试验点数据集合中的数据进行筛选,获得筛选试验点数据集合;根据多个实测参数,依次对多个试凑迭代参数进行参数试凑,得到初步的涡轴发动机模型;调整通用部件特性,结合节流试验数据对初步的涡轴发动机模型进行校准;对校准后的涡轴发动机模型进行雷诺数和间隙修正,得到目标涡轴发动机模型,即本发明提供一种无需依赖部件试验特性、仅利用试验数据的逆向建模方法,能够避免传统涡轴发动机建模方法对精准部件试验特性的依赖,建模条件更加宽松。

[0040] 2、本发明公开的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,利用试验数据参与建模过程,调整参数少、操作简单、效率高,在很短的时间内达到常规建模方法的模型精度。

[0041] 3、本发明公开的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,基于试验数据实现涡轴发动机逆向建模,能够提升涡轴发动机试验评估中模型的精度,提高涡轴发动机性能预测精度,提升试验采集数据有效性辨识率,提高试验高空性能评估精度,在工程应用中解决涡轴发动机相关工程问题。

附图说明

[0042] 图1示出实施例的基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法的流程图。

[0043] 图2示出实施例的参数试凑的流程图。

[0044] 图3示出实施例的效率平移调整的过程示意图。

[0045] 图4示出实施例的转速平移调整的过程示意图。

[0046] 图5示出实施例的共同工作线调整的过程示意图。

具体实施方式

[0047] 为了更好的说明本发明的目的和优点,下面结合附图和实例对发明内容做进一步说明。

[0048] 实施例1:

[0049] 以下将参考附图详细说明本发明的各种示例性实施例、特征和方面。附图中相同的附图标记表示功能相同或相似的元件。尽管在附图中示出了实施例的各种方面,但是除非特别指出,不必按比例绘制附图。

[0050] 在这里专用的词“示例性”意为“用作例子、实施例或说明性”。这里作为“示例性”所说明的任何实施例不必解释为优于或好于其它实施例。

[0051] 另外,为了更好的说明本发明,在下文的具体实施方式中给出了众多的具体细节。本领域技术人员应当理解,没有某些具体细节,本发明同样可以实施。在一些实例中,对于本领域技术人员熟知的方法、手段、元件和电路未作详细描述,以便于凸显本发明的主旨。

[0052] 如图1所示,本实施例公开的一种基于试验数据的涡轴发动机逆向建模方法,具体实现步骤如下:

[0053] 在步骤1中,对涡轴发动机试验数据进行分析及处理。

[0054] 在本实施例中,试验数据可以是涡轴发动机装机或者试验时获取到的高空性能数据。将试验数据转换至目标状态,是为了将所有的数据进行统一,以保证试验数据的准确性。目标状态可是国际标准大气平面状态、高空模拟试验状态等,本领域技术人员可以根据实际需要目标状态进行设置,本发明对此不作限制。

[0055] 在对试验数据进行状态转换之前,可以根据多个试验点在试验测试的测点布局、涡轴发动机结构剖面、涡轴发动机的设计报告、涡轴发动机的说明书等资料辅助,对多个试验点的试验数据进程初步确认,分析预估各部件的设计指标参数,并利用发动机不同节流状态下相同参数的连续性检查,排除多个试验点的试验数据中的坏点,以保证最终所建立的目标气动热力学模型的精度。其中,坏点可以是试验数据存在明显错误、或存在明显准确性不足等问题的试验点。

[0056] 典型例子,试验数据可以包括涡轴发动机进口物理空气流量、燃气涡轮转速、燃油流量、压气机出口温度、输出轴功率等与直升机在飞行中涡轴发动机的运行状态相关的信息。

[0057] 在步骤2中,对试验点数据集合中的数据进行筛选,获得筛选试验点数据集合。

[0058] 在本实施例中,对试验点数据集合中的数据进行筛选,根据验点数据集合中数据的雷诺数指数、燃气涡轮相对换算转速、节流状态数量等进行筛选。

[0059] 在步骤2.1中,选取试验点数据集合中的雷诺数指数大于雷诺数阈值的数据,得到第一试验点数据集合。

[0060] 在该实现方式中,可以根据模型精度、试验数据数量等需要对雷诺数阈值进行设置,本发明对此不作限制。例如,将雷诺数阈值设置为0.7,能够保证试验点数据集合1中的试验数据能够不受雷诺数因素的影响,并且使得第一试验点数据集合中的试验数据能够直接地反映涡轴发动机内部的气动热力匹配关系,同时可以保证模型的精度。所述RNI指数通过式(3)计算。

$$[0061] \quad RNI = \frac{P_t}{P_{t_{ref}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{ref} \cdot T_{t_{ref}}}{R \cdot T_t} \cdot \frac{\mu_{ref}}{\mu}} > 0.7 \quad (3)$$

[0062] 其中:RNI雷诺数指数、 P_t 为当前试验点进气总压、 $P_{t_{ref}}$ 为参考总压,值为101.325kPa、 R_{ref} 为参考气体常数,值为287J/(kg*K)、 R 为试验点气体常数、 $T_{t_{ref}}$ 为参考总温,值为288.15K、 T_t 为当前试验点进气总温、 μ_{ref} 为参考气体动力粘度,值为1.844E-05、 μ 为试验点气体动力粘度。

[0063] 在步骤2.2中,选取试验点数据集合1中的燃气涡轮相对换算转速大于转速阈值,得到试验点数据集合2。

[0064] 在该实现方式中,根据模型精度、试验数据数量等需要对转速阈值进行设置,本发明对此不作限制。例如,将转速阈值设置为0.9,涡轴发动机处于高负荷、高效率、高功率状

态,其上的传感器等处于较高精度测量区间,能够降低所确定的试验点数据集合2中的试验数据的相对误差,保证模型的精度。所述燃气涡轮相对换算转速通过式(4)计算。

$$[0065] \quad \frac{N_{1cor}}{N_{1,ISA,SLS,1.0}} > 0.9 \quad (4)$$

[0066] 其中: N_{1cor} 燃气涡轮换算转速, $N_{1,ISA,SLS,1.0}$ 为设计转速。

[0067] 在步骤2.3中,选取试验点数据集合2中对应的节流状态数据多的试验点,得到筛选试验点数据集合3。

[0068] 在该实现方式中,根据模型精度、试验数据数量等需要对状态数据量进行设置,本发明对此不作限制。

[0069] 典型例子,对不同节流状态所覆盖的试验点的试验数据的数据量进行统计,并按照数据量由大到小的顺序对不同节流状态的数据量进行排序,并根据排序在前的一个或几个节流状态的数据量确定状态数据量阈值。以便于据此选取试验点数据集合2中、排序在前的一个或几个节流状态所覆盖的试验点的试验数据,得到筛选试验点数据集合3。

[0070] 通过上述方式,在保证模型精度的同时,尽可能多的保留试验数据,以使得后续校准过程可以有足够的试验数据,提高校准的精确性,进一步提高模型的精度。

[0071] 在步骤3中,根据试验点数据,依次对气动热力学模型中的多个试凑迭代参数进行参数试凑,得到发动机初步模型;

[0072] 典型例子,步骤3中按照换算空气流量、燃烧室出口温度、压气机、动力涡轮部件的先后顺序开展模型可调参数迭代试凑,具体实现方法如下:

[0073] 表1. 参数匹配准则

编号	试验待匹配参数	试凑迭代参数
1	实测物理空气流量	进口换算空气流量
2	实测燃油流量	燃烧室出口温度
3	实测压气机出口温度	压气机效率
4	实测轴功率	动力涡轮效率

[0075] 1. 根据实测物理空气流量,对气动热力学模型中的进口换算流量进行试凑。

[0076] 2. 根据实测燃油流量,对气动热力学模型中的燃烧室出口温度进行试凑。

[0077] 3. 根据实测压气机出口温度,对气动热力学模型中的压气机效率进行试凑。

[0078] 4. 根据实测输出轴功率,对气动热力学模型中的动力涡轮效率进行试凑。

[0079] 不同试验数据的匹配准则,以表1参数匹配准则进行参数试凑,当针对试凑参数数量小于试验待匹配参数数量,根据模型可调参数迭代试凑得到试凑结果;当针对试凑参数数量大于试验待匹配参数数量的情况,利用步骤1中的资料辅助,根据多个参数试凑结果判断每个参数的初选合理值范围。

[0080] 在该实现方式中,需按照上述顺序依次进行试凑,均需要保证试凑成功之后才可以进行下一步骤的试凑,参数试凑流程如图2所示。其中,试凑成功可以是指,所试凑出的气动热力学模型中的参数,可以使得气动热力学模型同时满足流量连续方程、能量守恒方程、功率平衡方程、转速匹配等准则。

[0081] 由于实测参数与试凑迭代参数存在单调或单值对应关系,根据实测参数的变化,可以试凑出与之存在对应关系的试凑迭代参数。以实测燃油流量对气动热力学模型中的燃

烧室出口温度进行试凑为例。由于实测燃油流量越大,表明涡轴发动机的燃烧室中所添加的燃料越多,对燃烧室中的燃料进行燃烧所获得的燃烧室出口温度越高。预先设置一个燃烧室出口温度,并通过气动热力学模型计算出预测的燃油流量,并判断预测的燃油流量与实测燃油流量是否相同。在预测的燃油流量与实测燃油流量不相同,修改气动热力学模型中与燃烧室出口温度相关的参数,并重新根据修改参数后的气动热力学模型计算预测的燃油流量。在预测的燃油流量与实测燃油流量相同、且修改参数后的气动热力学模型同时满足流量连续方程、能量守恒方程、功率平衡方程、转速匹配等准则时,确定试凑成功,得到发动机初步模型。其他参数试凑过程类似,此处不再赘述。

[0082] 应当理解的是,上述试凑过程仅为本发明所提供的一种示例,本领域技术人员能够根据实际需要,对试凑过程进行设置,本发明对此不作限制。

[0083] 在步骤4中,基于初步模型和节流状态试验数据,调整通用部件特性,得到校准后的数学模型。

[0084] 在一种可能的实现方式中,基于通用涡轴发动机的部件特性,通过效率平移调整、转速平移调整、共同工作线调整中的至少一种方式,对试凑后的气动热力学模型进行校准,得到校准后的气动热力学模型。

[0085] 在一种可能的实现方式中,效率平移调整,可以包括:根据实际检测到的节流状态效率的分布,进行至少一个部件特性的效率平移调整,以对试凑后的气动热力学模型进行校准,得到校准后的气动热力学模型。其中,在进行至少一个部件特性的效率平移调整的过程中,循环参考点不变,循环状态点可以包括筛选试验点数据集合中数据量最大的节流状态所覆盖的试验点。

[0086] 典型例子,图3示出根据本实施例的效率平移调整的过程示意图。如图3所示,图中所示的并未通过线连接在一起的多个点表示的是实际检测到的节流状态效率,通过线连接在一起的多个点表示的是根据试凑后的气动热力学模型计算所获得的节流状态效率曲线。保持循环参考点不变,经过多次效率平移调整,多次校准气动热力学模型,直至将计算所获得的节流状态效率曲线调整至逼近实际检测到的节流状态效率的分布状态,获得最终校准后的气动热力学模型。

[0087] 在一种可能的实现方式中,转速平移调整,可以包括:根据实际检测到的转速的分布,进行至少一个部件特性的转速平移调整,以对试凑后的气动热力学模型进行校准,得到校准后的气动热力学模型。其中,在进行至少一个部件特性的转速平移调整的过程中,对应的部件转速线位置不变。

[0088] 典型例子,图4示出根据本实施例的转速平移调整的过程示意图。如图4所示,图中所示的并未通过线连接在一起的多个点表示的是实际检测到的转速,通过线连接在一起的多个点表示的是根据试凑后的气动热力学模型计算所获得的转速曲线。保持部件转速线位置不变,经过多次转速平移调整,多次校准气动热力学模型,直至将计算所获得的转速曲线调整至逼近实际检测到的转速分布状态,获得最终校准后的气动热力学模型。

[0089] 在一种可能的实现方式中,共同工作线调整,可以包括:根据确定的压气机压比与流量的关系,在不同转速下,通过可变几何调整进行共同工作线的上下调整,以对试凑后的气动热力学模型进行校准,得到校准后的气动热力学模型。

[0090] 典型例子,图5示出根据本实施例的共同工作线调整的过程示意图。如图5所示,图

中所示的并未通过线连接在一起的多个点表示的是实际检测到的涡轴发动机各部件共同工作时共同工作线,该共同工作线为压气机压比-流量线。通过线连接在一起的多个点表示的是根据试凑后的气动热力学模型计算所获得的共同工作线。在不同的转速下,通过多次可变几何调整,多次校准气动热力学模型,直至将计算所获得的共同工作线调整至逼近实际检测到的共同工作线,获得最终校准后的气动热力学模型。

[0091] 在步骤5中,利用步骤4校准后的部件特性,结合全包线误差信息的修正方法对步骤4构建的基于试验数据的涡轴发动机逆向构建模型进行修正,进一步提高模型精度,得到目标模型;全包线误差信息的修正方法包括雷诺数修正方法、间隙修正方法。

[0092] 在一种可能的实现方式中,可以根据涡轮发动机所对应的飞机包线(飞行包线,是指以飞行速度、高度、过载、环境温度等参数为坐标,表示飞机飞行范围和飞机使用限制条件的封闭几何图形),采用雷诺数修正方式和间隙修正方式中的至少一种,对校准后的气动热力学模型进行修正,得到目标模型。

[0093] 在一种可能的实现方式中,雷诺数修正方式包括:

[0094] 获取实际检测到的涡轴发动机的多个试验点的试验数据的误差和进口压力,以及确定进口压力所对应耗油率参数;

[0095] 在确定误差与进口压力分布的相关时,且低进口压力条件下呈现出耗油率参数低于试验值的情况时,则通过雷诺数修正方式对校准后的气动热力学模型进行修正,得到目标气动热力学模型。其中,耗油率计算值是根据校准后的气动热力学模型计算得到的。

[0096] 在该实现方式中,误差与进口压力分布的相关系数可以表示误差与进口压力分布的相关程度,相关系数的数值越大,误差与进口压力分布的相关性越明显。通过雷诺数修正方式对校准后的气动热力学模型进行修正,可以是在进口压力低于压力阈值时,降低校准后的气动热力学模型中压缩部件的效率,能够根据飞机包线在模型修正前后的变化情况对降低压缩部件效率的幅度进行调整。

[0097] 在一种可能的实现方式中,间隙修正方式包括:

[0098] 获取实际检测到的涡轴发动机的多个试验点的试验数据的误差和进口温度;

[0099] 在确定误差与进口温度分布的相关时,通过间隙修正方式对校准后的气动热力学模型进行修正,得到目标气动热力学模型。

[0100] 在该实现方式中,误差与进口温度分布的相关系数可以表示误差与进口温度分布的相关程度,相关系数的数值越大,误差与进口温度分布的相关性越明显。通过间隙修正方式对校准后的气动热力学模型进行修正,可以是对涡轴发动机的叶片叶尖间隙的修正量进行调整。可以根据飞机包线在模型修正前后的变化情况对调整叶片叶尖间隙的修正量的幅度进行调整。

[0101] 步骤6:根据步骤5中目标模型,提升涡轴发动机试验评估中模型的精度,提高涡轴发动机性能预测精度,提升试验采集数据有效性辨识度,提高试验高空性能评估精度,在工程应用中解决涡轴发动机相关工程问题。

[0102] 步骤5中基于试验数据的涡轴发动机逆向构建模型,在涡轴发动机全包线范围内主要性能参数仿真误差由5%左右提升至1%以内,能够大幅提升涡轴发动机性能预测水平,也能够用于对试验测试数据有效性进行判别,解决涡轴发动机应用领域相关工程问题。

[0103] 本实施例所提供的涡轴发动机的建模方法,对涡轴发动机的多个试验点的试验数

据进行状态转换,得到处于目标试验状态下的试验点数据集合;对试验点数据集合中的数据进行筛选,获得筛选试验点数据集合;根据实际检测到的多个实测参数,依次对气动热力学模型中的多个试凑迭代参数进行参数试凑,得到试凑后的气动热力学模型;对试凑后的气动热力学模型进行校准,得到校准后的气动热力学模型;对校准后的气动热力学模型进行修正,得到目标气动热力学模型。构建涡轴发动机的目标气动热力学模型的周期短,所构建的涡轴发动机的目标气动热力学模型的误差小、精度高。

[0104] 以上所述的具体描述,对发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

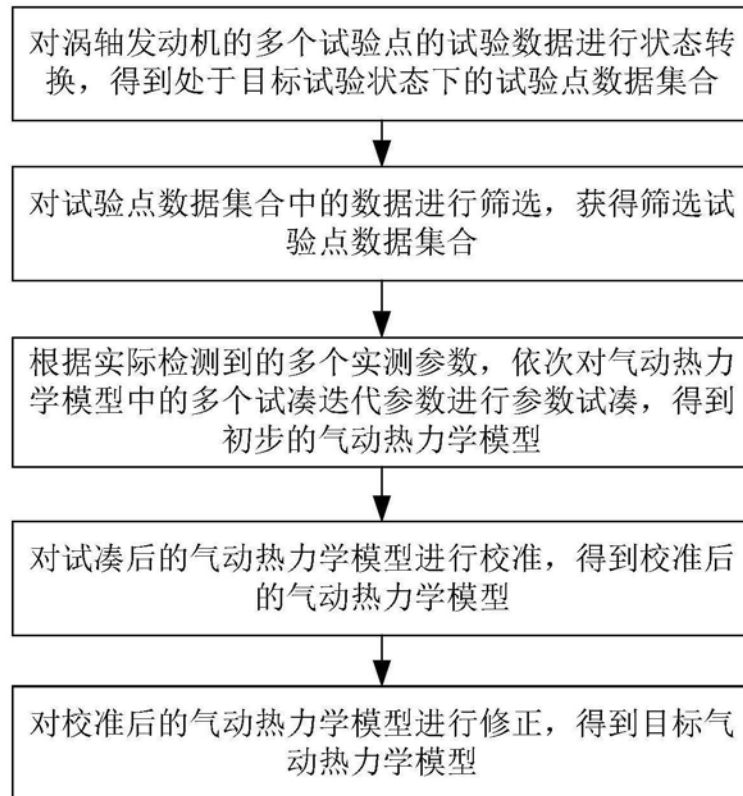


图1

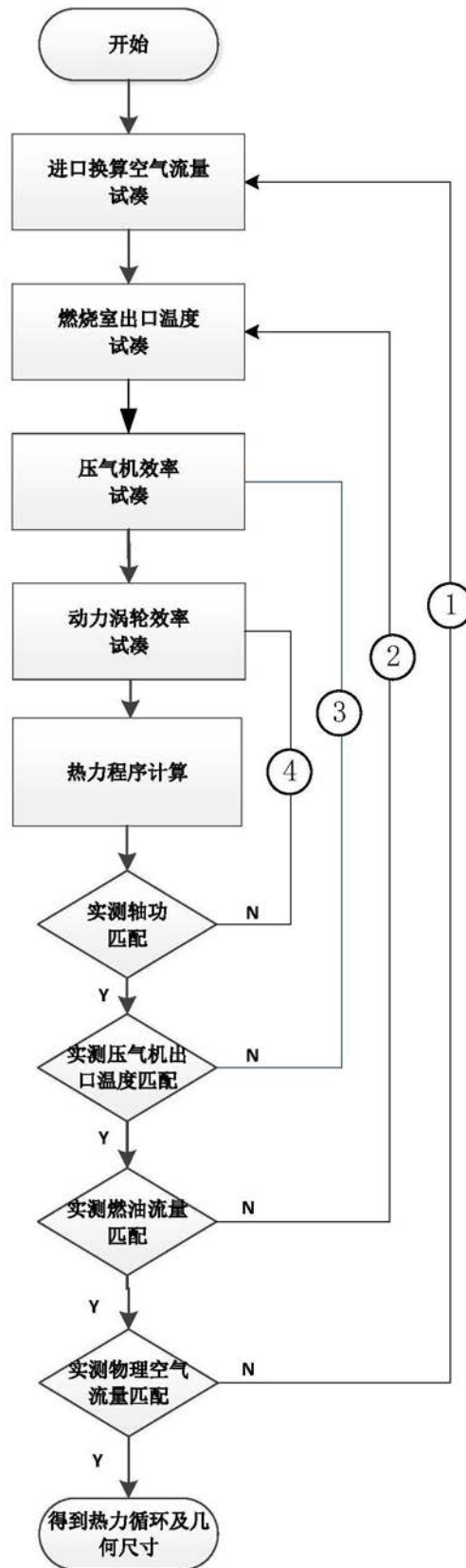


图2

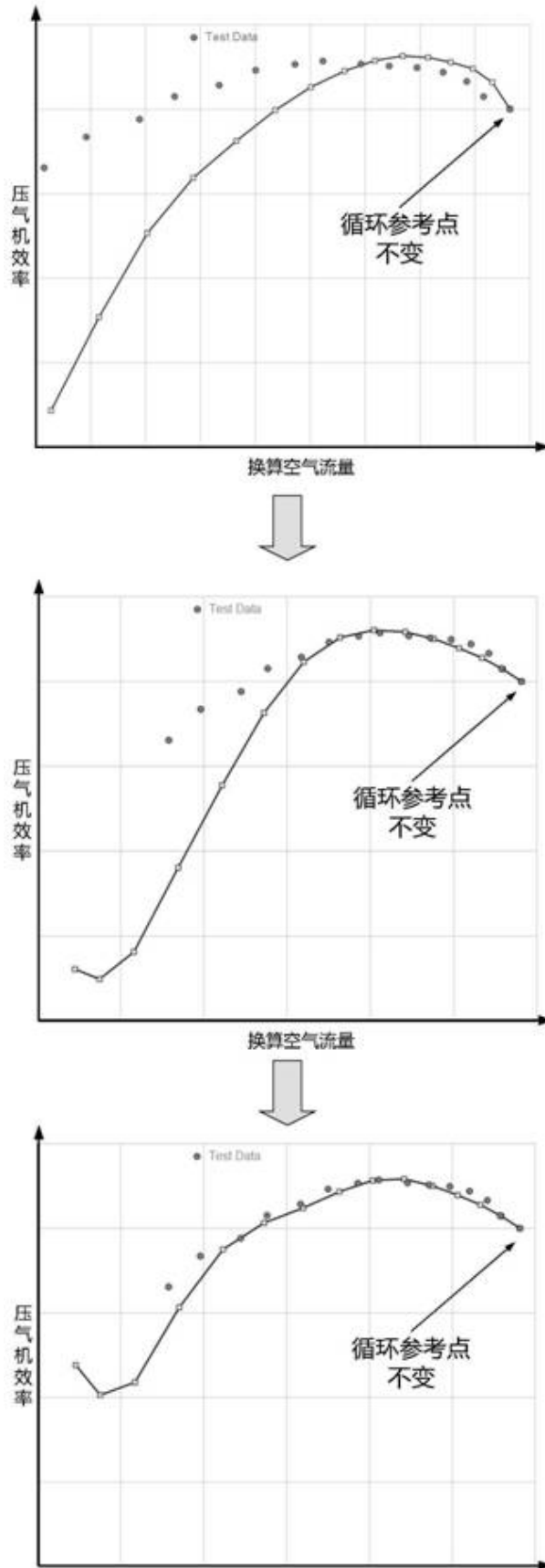


图3

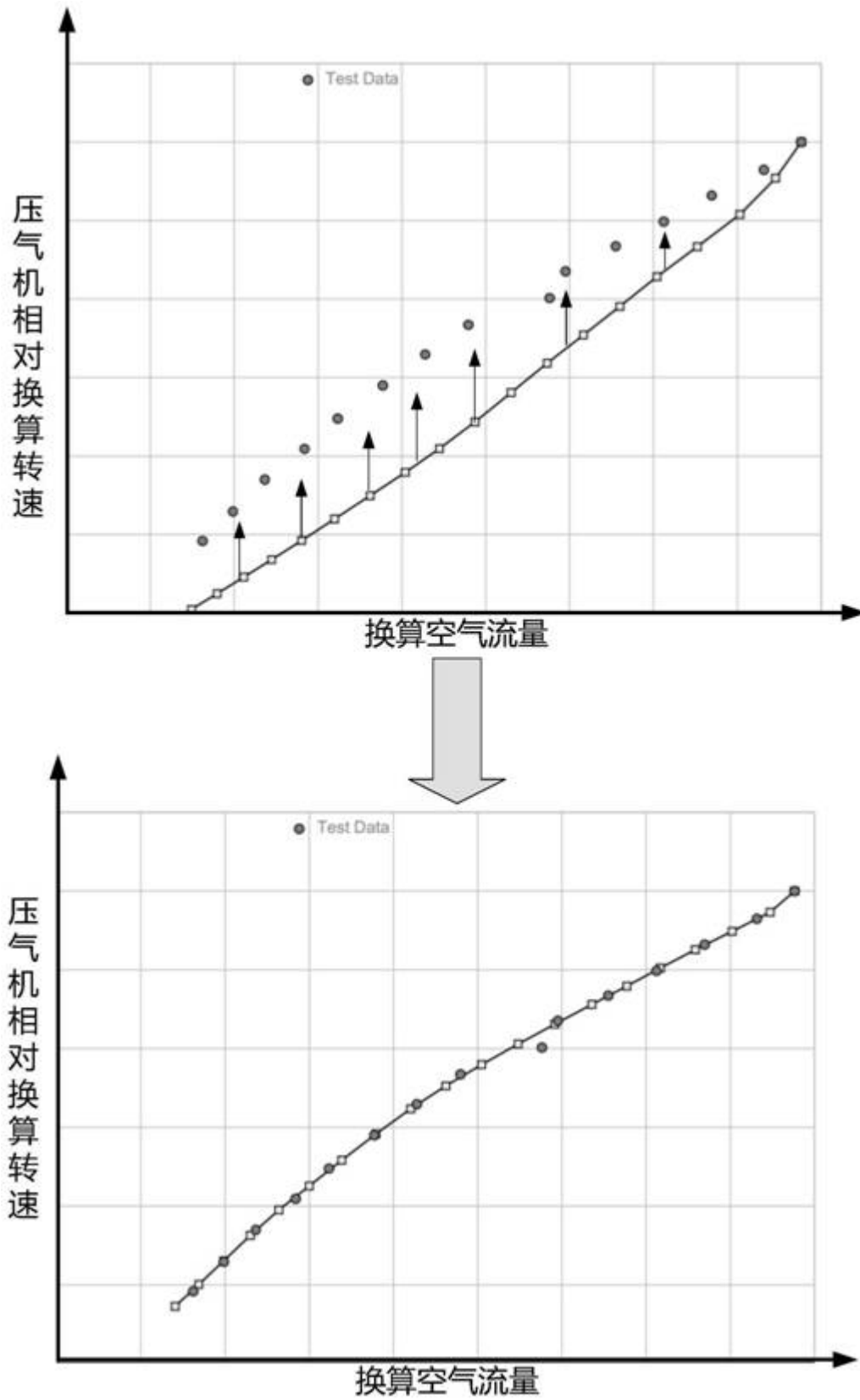


图4

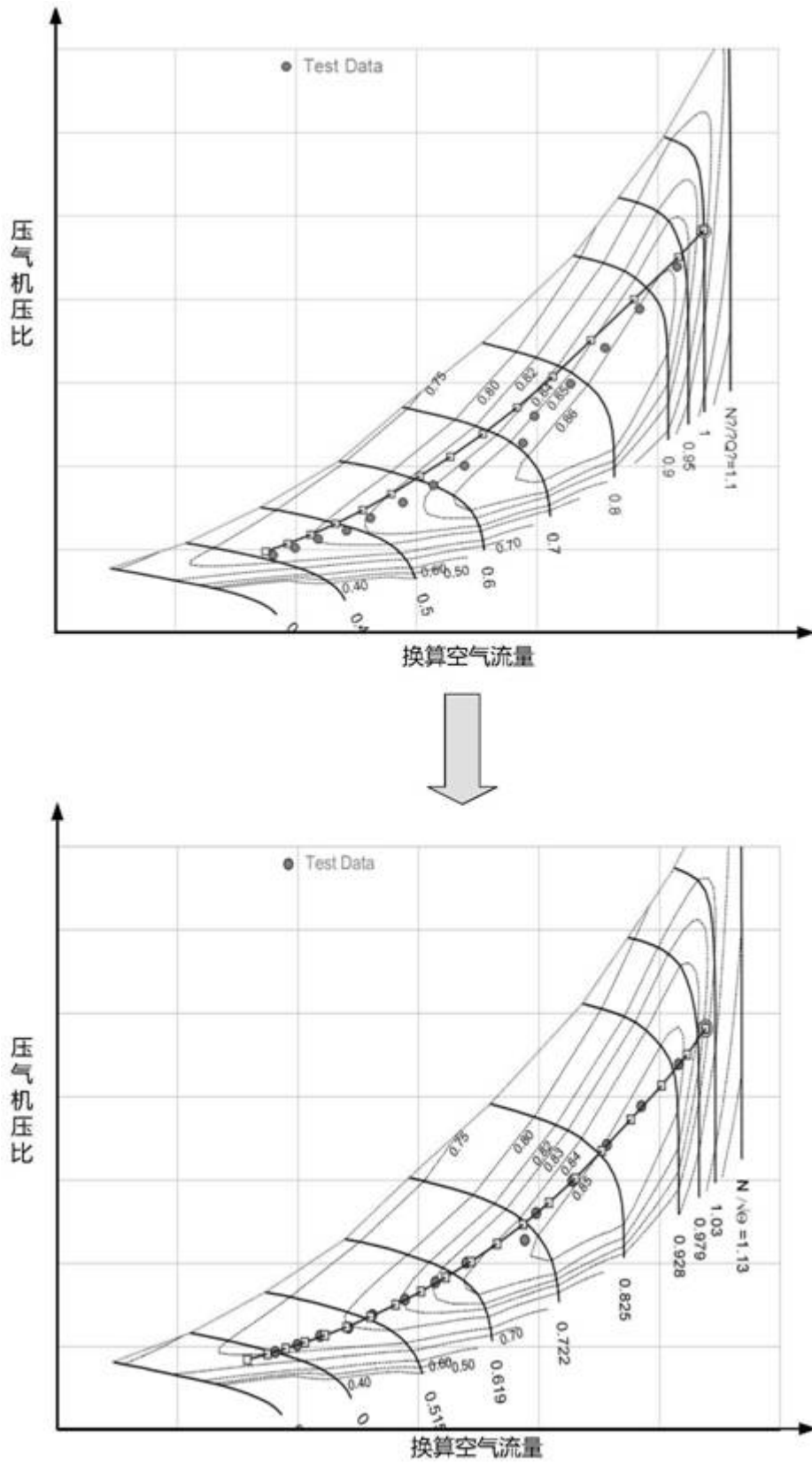


图5