

短周期风洞叶栅气动状态调节与控制

李红才, 朱惠人

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘要: 为获得实验中维持叶栅气动状态稳定的控制方法, 研究短周期叶栅风洞气动状态同阀门开度的关系, 根据实验的阀门流量特性数据计算阀门开度, 准确调试出需要的实验状态。将调压阀流量特性数据作为专家知识同传统PID(比例积分微分)方法相结合, 得到实验中维持叶栅气动状态稳定的有效方法, 该方法能自动控制参数并精确控制叶栅气动状态, 而且具有计算量小、压力稳定快以及不会出现震荡的优点。

关键词: 短周期风洞; 流量特性曲线; PID; 气动状态控制

中图分类号: V231

文献标识码: A

Aerodynamic State Regulation and Control of Cascade in Short Duration Wind Tunnel

Li Hongcai, Zhu Huiren

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to obtain an effective method maintaining the cascade aerodynamic state during the experiment. The relations of the cascade aerodynamic state and the openings of the valves in short duration wind tunnel are studied. Using the calculated valves' openings according to the valves' discharge characteristic data, the required state can be reached. By combining the pressure regulating valve's discharge characteristic data with the traditional Proportional-Integral-Differential(PID) method, an effective method maintaining the cascade aerodynamic state during the experiment is given. The new method can automatically compute the control parameters and precisely control the cascade aerodynamic state, while the calculation amount is small and stable pressure state can be achieved rapidly and monotonously.

Key words: short duration wind tunnel; flow characteristic curve; PID; aerodynamic state control

0 引言

在涡轮叶片设计中, 高速风洞接近真实状态的实验数据具有重要价值。短周期高速吹风风洞因良好的可维护性和经济性特点得到了较广泛的应用, 这类风洞中较典型的有牛津大学的环形叶栅冷态吹风风洞^[1]、维吉尼亚大学的吹风风洞^[2]以及美国俄亥俄州 Wright Patterson 空军基地主流预加热的吹风风洞^[3]。短周期吹风风洞实验的雷诺数

和马赫数可以在较大范围内调节, 并且主要采用高压储气罐作为气体来源, 实验中气源压力会有较大的下降, 因此如何快速调试出特定的实验状态并保证实验过程中状态稳定是风洞设计中的重要问题。国内在这方面的基础相对薄弱, 如中科院工程热物理所的 IET 短周期涡轮实验台^[4]没有调压阀, 实验中涡轮入口压力不断下降。

本文针对西北工业大学的短周期跨声速叶栅传热风洞^[5], 根据实验阀门流量特性数据, 类比空气系统网络法^[6]将阀门模化为单元, 求解实验状态同阀门开度的对应关系。将调压阀流量特性数据作为专家知识, 同PID控制^[7]方法结合, 以获得实验中维持叶栅气动状态稳定的简单、高效控制方

法。短周期吹风风洞上阀门开度的调节方法以及维持实验段压力稳定的控制方法,能保证该风洞上大量后续实验顺利进行,同时对其他同类型风洞也具有一定的借鉴意义。

1 实验装置介绍

本文研究的风洞为短周期跨声速叶栅传热风洞,可进行叶片表面气动及换热特性实验研究。风洞实验原理图及各主要部件照片如图1所示,实验段上游安装大开角扩散段和稳压舱,以提高实验段气流的均匀性。

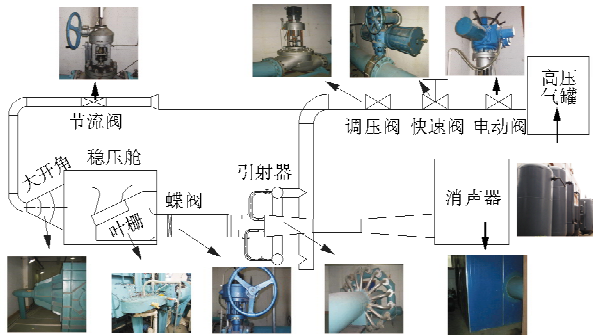


图1 短周期跨声速叶栅传热风洞实验原理图

Fig. 1 Experimental scheme of the short duration wind tunnel

高压气源容积为 140 m^3 ,由8个气罐并联组成,最高设计压力为 $8.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。电磁阀为安全阀门,风洞长期不用时关闭,快速阀用于实验开始和结束时快速打开和切断气流,风洞出口的消声器用来降低气流噪声。风洞采用吹、吸气相结合结构,以扩大实验雷诺数范围。吹气主要靠高压气源压力,实验段入口最高设计压力为 $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,吸气通过实验段下游引射器,引射器由16根可单独开关的拉法尔喷管组成,最大可将叶栅下游压力降至 $0.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。调节实验段气动状态的部件是调压阀、节流阀、蝶阀和引射器。调压阀用伺服电机驱动,是实验中控制气动状态稳定的主要部件。当风洞出口压力高于大气压时,通过节流阀和蝶阀开度控制叶栅气动状态;当风洞出口压力低于大气压时,通过节流阀开度、引射喷管打开根数和引射气体的压力调节叶栅气动状态。该风洞实验段主要参数如下:入口湍流度 $< 2\%$,入口压力范围 $0.2 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,基于叶栅弦长的实验段入口雷

诺数范围 $1.0 \times 10^5 \sim 16.0 \times 10^5$,出口马赫数范围 $0 \sim 1.6$,空气流量范围 $0.5 \sim 20.0 \text{ kg/s}$ 。

实验前打开电磁阀,并设置合适的调压阀、节流阀和蝶阀开度(或打开的引射喷管根数)。由计算机发送“开始”信号开始实验,快速阀打开,测试系统开始数据采集。快速阀完全打开后,实验段达到预定的气动状态,但随着实验进行,气源压力不断下降,由计算机通过控制程序调节调压阀开度,保证阀后压力即实验状态不变。测量完成后,由计算机发送“结束”信号关闭快速阀并停止数据采集。如果实验过程中出现异常情况,安全控制程序会紧急停止实验,有关该风洞的更多信息请参考文献[7]。

2 叶栅气动状态调节与控制

2.1 叶栅气动状态调节

本文涉及的相关物理量、下标定义如表1和表2所示。

表1 物理量符号表

Table 1 Symbol of physical quantities

名称	符号	名称	符号
面积	A	叶栅压比	p_r
流量	G	叶栅入口雷诺数	Re
比热比	k	气流温度	T
阀门开度	kd	流量函数	q, y
叶片弦长	L	动力粘性系数	μ
叶栅入口马赫数	Ma	调压阀到喷管喉部	σ
喷管根数	n	总压恢复系数	σ
压力	p	速度系数	λ

表2 下标定义

Table 2 Definition of subscripts

名称	定义	名称	定义
滞止参数	t	叶栅出口	4
大气	0	蝶阀(前)	5
调压阀(后)	1	引射喷管喉部	6
节流阀(前)	2	实验段流路	s
叶栅入口	3	引射器流路	y

叶栅实验参数为进口雷诺数 Re 和压比 p_r ,短周期风洞在最初设计时气动状态调试主要靠实验人员经验,需要多次调试才能确定一个实验状态。下文将给出一种根据各阀门流量特性确定调压阀、节流阀、蝶阀开度或打开的引射喷管根数的方法,

该方法类比了航空发动机空气系统的求解思路^[6]。

阀门的流量特性,即阀门不同开度下流量函数和阀门压比的关系。这种关系很难用解析式表示,本文计算依据实验得到的阀门流量特性曲线。调压阀的流量特性曲线如图 2 所示,图中数据涵盖了所有的实验状态,每一条曲线都是调压阀出口的等流量函数线。为了计算方便,调压阀、节流阀和蝶阀的特性曲线使用的都是阀后总压同阀前总压之比。

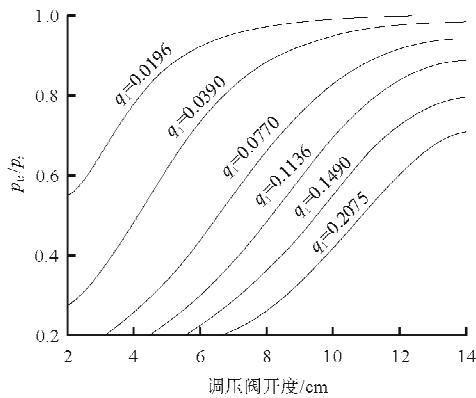


图 2 调压阀流量特性曲线

Fig. 2 Characteristic curve of pressure regulating valve

节流阀和蝶阀的流量特性曲线分别如图 3 和图 4 所示, q_2 为节流阀入口流量函数, q_3 为蝶阀入口流量函数。节流阀开度通过螺杆机构调节,采用调节盘圈数表示,因为调节盘圈数比螺杆位移精度高,阀门开度范围 0~60 圈,开度小于 8 圈的数据由于图幅限制未标出。蝶阀流量特性实验中引射喷管全关,所以阀后压力为大气压 p_0 。蝶阀开度用角度表示,有效范围 $7^\circ \sim 84^\circ$,考虑阀门本身特点,当阀门开度大于 40° ,其流动特性等同于全开,所以实验数据截止 40° 。

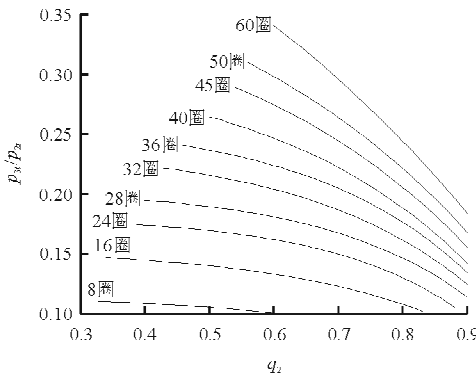


图 3 节流阀流量特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of throttle valve

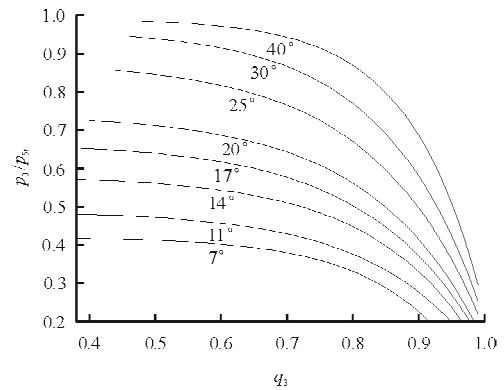


图 4 蝶阀流量特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of butterfly valve

蝶阀全开时引射器的引射能力曲线如图 5 所示, p_4 为叶栅后静压, p_5 为调节后压力。实验段气流是被引射气体,其流量改变会使曲线位置发生偏移,所以曲线是在相应实验段流量下得到的,使用曲线计算引射气体压力时结果就更准确。

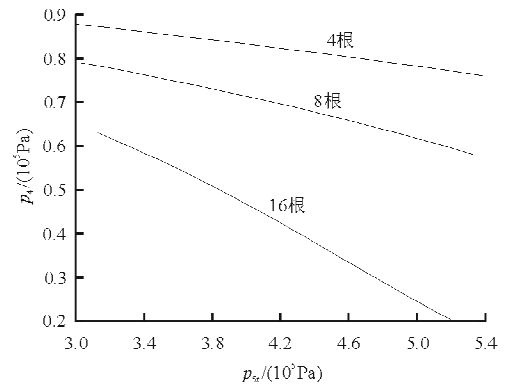


图 5 引射器引射特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of ejector

从图 5 可以看出,通过改变引射喷管根数和调压阀后压力 ($2.5 \times 10^5 \sim 5.4 \times 10^5$ Pa) 能使叶栅后静压在 $0.2 \times 10^5 \sim 0.9 \times 10^5$ Pa 范围内连续调节,不使用蝶阀仅打开引射器。而当叶栅出口静压高于 0.9×10^5 Pa 时使用蝶阀即可,故蝶阀和引射可分开使用,简化控制,同时避免高压气体浪费。需要说明的是,确定使用蝶阀或引射器的叶栅出口静压分界点小于大气压 p_0 ,因为实验段出口有很长的扩张段,在扩张段中气流速度下降,静压升高,所以关闭引射器时叶栅下游静压也会低于大气压,但总压总是高于大气压。

在给定实验段的进口雷诺数 Re 和叶栅压比

p_r 的情况下,实验段流量可由雷诺数定义(式1)得到,再根据实验段流量特性曲线(式2)和实验段流量公式(式3),求得叶栅入口压力 p_{3t} ,由压比定义(式4)可得叶栅出口静压 p_4 ,再用实验段流量的另一个表达式(式5)和叶栅后总压与静压的关系式(式6)得叶栅下游总压 p_{4t} 。

$$Re = G_s L / (\mu A_3) \quad (1)$$

$$q_3 = f_3(p_r) \quad (2)$$

$$G_s = K \cdot A_3 q_3 \cdot p_{3t} / \sqrt{T_t} \quad (3)$$

$$p_r = p_{3t} / p_4 \quad (4)$$

$$G_s = K \cdot A_4 y(\lambda_3) \cdot p_4 / \sqrt{T_t} \quad (5)$$

$$p_{4t} = p_4 / \pi(\lambda_4) \quad (6)$$

式中: K 为常数。

已知实验段参数,可计算阀门开度和引射喷管打开根数,分两种情况。

(1) 使用引射器、蝶阀全开

引射器的引射能力表示为

$$p_4 = f_5(p_{1t}, n) \quad (7)$$

引射喷管喉部处于临界状态,流量为

$$G_y = K \cdot n A_6 \cdot \sigma p_{1t} / \sqrt{T_t} \quad (8)$$

通过式(7)得出调压阀后压力 p_{1t} ,通过式(8)得出引射气体流量。求解 p_{1t} 的过程也可在引射器引射特性曲线(图5)上完成,即作 $y = p_4$ 的直线交某条引射能力曲线于一点,该点对应的横坐标值即为 p_{1t} ,所使用的喷管根数也随之确定。如果 $y = p_4$ 同两条曲线相交,则根据情况选择一个交点。

节流阀入口流量可表示为

$$G_s = K \cdot A_2 q_2 \cdot p_{2t} / \sqrt{T_t} \quad (9)$$

节流阀流量特性表示为

$$p_{3t} / p_{2t} = f_2(q_2, kd_2) \quad (10)$$

因为节流阀与调压阀距离较近,总压损失可以忽略,故 $p_{2t} = p_{1t}$,由式(9)可得 q_2 ,再通过式(10)得节流阀开度。在图3上求解的方法是,找到坐标点($q_2, p_{3t} / p_{2t}$),用已知节流阀流量特性曲线上的点插值得到节流阀开度。

调压阀后流量公式为

$$G = K \cdot A_1 q_1 \cdot p_{1t} / \sqrt{T_t} \quad (11)$$

$$G = G_s + G_y \quad (12)$$

调压阀流量特性表示为

$$p_{1t} / p_t = f_1(q_1, kd_1) \quad (13)$$

由式(11)可得调压阀后流量函数 q_1 ,然后由式(13)计算调压阀开度。式(13)中气源压力 p_t 取值并不唯一,可根据 p_{1t} 和实验用气量选取。在图2上的求解方法是,插值求得调压阀工作状态的等流量特性曲线,求该曲线与 $y = q_1$ 的交点,交点的横坐标就是调压阀开度。

(2) 关闭引射器、使用蝶阀

引射器没有流量, $G_y = 0$,蝶阀流量可表示为

$$G_s = K \cdot A_5 q_5 \cdot p_{5t} / \sqrt{T_t} \quad (14)$$

蝶阀与叶栅出口距离较近,总压损失可以忽略,故 $p_{5t} = p_{4t}$,蝶阀流量特性可表示为

$$p_0 / p_{5t} = f_5(q_5, kd_5) \quad (15)$$

计算蝶阀开度的方法同节流阀类似,节流阀、调压阀的计算方法同情况(1)。不同的是调压阀后压力 p_{1t} 不再是唯一的,可根据叶栅前总压 p_{3t} 适当选取,而情况(1)中 p_{1t} 是由叶栅后静压 p_4 决定的。

使用上述方法,对于给定实验状态,可以计算出相应的阀门开度和引射喷管根数。如果阀门流量特性数据存在误差,则计算的阀门开度也会出现偏差,从而导致实验状态偏差。为了能准确地调试出所需的实验状态,还需要计算出各阀门开度或引射气体压力(即调压阀后压力)对 Re 和 p_r 的敏感度,并据此对实际调试出现的状态偏差进行修正。本文编制了专门的程序来进行该计算过程,一般通过一或两次调试即可准确达到预计的实验状态。

2.2 叶栅气动状态控制

本文研究的短周期风洞为吹风式风洞,由于高压气源容积有限,实验过程中气源压力不断下降。为保证实验过程中气动状态稳定,设计可灵活调节的调压阀。实验中所有气体都要经过调压阀,所以只要保证调压阀后压力不变即可。寻找一种简单有效的方法控制调压阀后压力是风洞控制系统的重要内容。

传统 PID 方法控制简单,应用范围很广,因此短周期风洞控制系统设计时首先考虑采用传统 PID 方法^[5]。但由于风洞实验参数范围大,每个实验状态对应的 PID 参数需根据经验选取并通过多次状态调试确定,工作量很大。如果 PID 参数选取不合理导致实验段入口压力震荡或发散,超过最

大设计压力,会给状态调试带来危险。小压力状态调试过程中出现压力震荡的情形如图 6 所示。

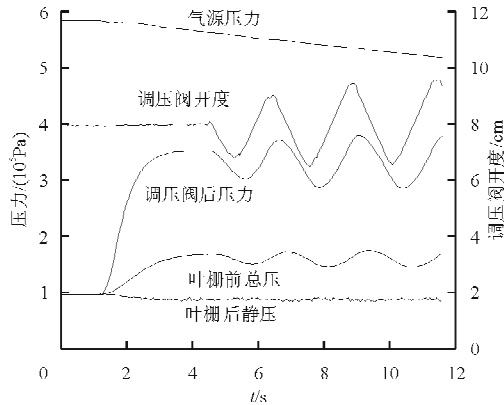


图 6 错误的 PID 参数导致压力波动

Fig. 6 Pressure fluctuation due to wrong PID parameters

改进的传统 PID 控制方法,如学习型 PID 控制^[8]或专家一模糊 PID 控制^[9],能改善 PID 方法的适应性和稳定性。改进的 PID 方法可在几秒内稳定系统,能很好地应用于长时间稳定运行的风洞。但本文研究的短周期风洞总有效时间仅 5 s,不适用于上述方法。

如果能根据先验知识(或称专家知识)准确计算出每个状态最优的 PID 控制参数,即能省去人为给定 PID 控制参数,使系统在最短时间内达到稳定。对于短周期风洞,先验知识就是调压阀的等流量函数线。

调压阀的等流量函数线涵盖了风洞所有实验状态点,所以对图 2 中的曲线进行插值,即可得到任意实验状态下的调压阀后等流量函数线。要保证实验过程中调压阀后压力不变,调压阀的工作点只能沿这条等流量函数线移动,所以只要计算调压阀压比的变化率(实际只需计算气源压力 p_t 的变化率,因为调压阀后压力 p_{1r} 是不变的),并根据等流量函数线当前工作点的切线斜率即可计算出调压阀开度的变化率。调压阀开度变化同气源压力变化的关系可转化为传统 PID 方法的比例系数,但又有所不同,传统 PID 方法是在出现偏差后进行修正,而这里是根据预知出现的偏差进行控制,没有滞后现象。同时由于气源压力的变化基本为线性,而调压阀后等流量函数线为非线性,所以这种控制方法是非线性的。

计算的调压阀等流量函数线可能出现偏差,还需要结合 PID 方法的积分项进行修正,因为微分操作会放大压力测量的噪声降低控制方法的稳定性,所以没有采用。经过验证,该方法精度高、控制简单并且不会出现震荡,适用于所有实验状态。

除控制方法外,快速阀门打开时间(约 2 s)也会影响风洞的稳定时间。先将调压阀开度设为大于预定值,在气控阀打开的过程中用设定的函数让调压阀开度回到预定值,起到缩短气流稳定时间的作用。低压(实验段出口压力低于大气压)调试状态中调压阀开度变化曲线及对应的压力曲线如图 7 所示。

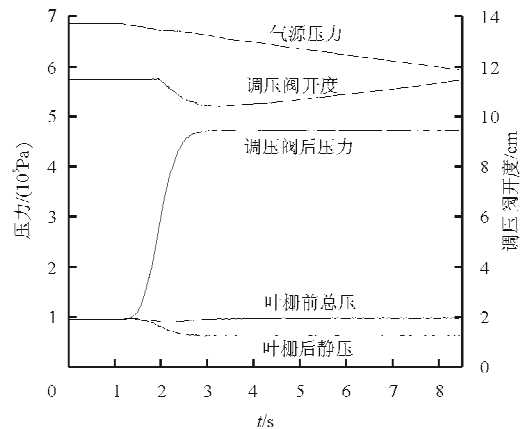


图 7 实验过程中的压力曲线

Fig. 7 Pressure curves during the experiment

3 误差分析

Re 和 p_r 均为间接测量参数,定义见式(4)和式(1),取 $k=1.4, G_s$ 计算如下

$$G_s = K \cdot A_s \frac{p_{3r}}{\sqrt{T_t}} \cdot 1.2^3 Ma (1 + 0.2Ma^2)^3 \quad (16)$$

$$Ma = \sqrt{5 \left[\left(\frac{p_{3r}}{p_{3r} - \Delta p} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (17)$$

式中: Ma 为叶栅进口马赫数; p_{3r} 为叶栅入口总压; Δp 为差压(总静压之差)。

叶栅前总压 p_{3r} 、叶栅后静压 p_t 的随机误差为 1 kPa,叶栅前差压 Δp 的随机误差为 0.03 kPa,气流总温 T_t 为常值,根据相对随机误差传递公式^[10]有

$$\frac{\delta p_r}{p_r} = \sqrt{\left(\frac{\delta p_{3t}}{p_{3t}}\right)^2 + \left(\frac{\delta p_4}{p_4}\right)^2} \quad (18)$$

$$\frac{\delta Re}{Re} = \sqrt{\left(\frac{\delta p_{3t}}{p_{3t}}\right)^2 + \left(1 + \frac{1.2Ma^2}{1+0.2Ma^2}\right)^2 \left(\frac{\delta Ma}{Ma}\right)^2} \quad (19)$$

式中: Ma 的相对随机误差为 $\frac{\delta Ma}{Ma} =$

$$\frac{\left(\frac{p_{3t}}{p_{3t} - \Delta p}\right)^{\frac{2}{7}} \cdot \frac{\Delta p}{p_{3t} - \Delta p}}{7 \left[\left(\frac{p_{3t}}{p_{3t} - \Delta p}\right)^{\frac{2}{7}} - 1\right]} \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta p_{3t}}{p_{3t}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2}$$

显然 p_r 和 Re 的相对误差同具体状态相关,在整个风洞实验范围内, p_r 和 Re 的相对误差分别小于 3.2% 和 1.9%。

4 结 论

(1) 使用阀门流量特性曲线,计算短周期风洞实验状态对应的阀门开度,是一种简便有效的工程方法,结合状态参数(如 Re 、 p_r)对阀门开度的敏感度对计算偏差进行修正,通过一至两次调试就能准确获得所需的实验状态。

(2) 将调压阀的等流量函数线作为专家知识,同传统 PID 方法结合,能自动计算控制参数,并根据预知出现的偏差对调压阀开度进行控制。这种控制方法能实现任意实验状态下对短周期风洞状态简单、高效和安全的控制,对其他短周期风洞具有借鉴意义。

参考文献

- [1] Guo S M, Lai C C, Jones T V, et al. Influence of surface roughness on heat transfer and effectiveness for a fully film cooled nozzle guide vane measured by wide band liquid crystals and direct heat flux gauges[R]. Munich Germany; ASME 2000-GT-0204, 2000.
- [2] Smith D E, Bubb J V, Popp O, et al. An investigation of heat transfer in a film cooled transonic turbine cascade: Part I—steady heat transfer [R]. Munich Germany; ASME 2000-GT-0202, 2000.
- [3] Barringer M D, Thole K A, Polanka M D. Effects of combustor exit profiles on high pressure turbine vane aerodynamics and heat transfer [R]. Barcelona Spain; ASME 2006-GT-90277, 2006.
- [4] 秦立森, 赵晓路, 陈党慧, 等. IET 短周期涡轮实验台[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2006, 19(2): 47-52.
Qin Lisen, Zhao Xiaolu, Chen Danghui, et al. IET short duration turbine test rig[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2006, 19(2): 47-52. (in Chinese)
- [5] 朱彦伟. 短周期传热风洞气动特性模拟与控制方法研究[D]. 西安: 西北工业大学动力与能源学院, 2007.
Zhu Yanwei. Simulation and control of the high speed transient blade wind tunnel's pneumatic characteristics[D]. Xi'an; School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [6] 陆海鹰, 杨燕生, 王鸣. 航空发动机空气系统特性的数值模拟[J]. 航空发动机, 1997(1): 6-13.
Lu Haiying, Yang Yansheng, Wang Ming. Numerical simulation of the aeroengine air system's characteristics[J]. Aeroengine, 1997(1): 6-13. (in Chinese)
- [7] 王蕾, 宋文忠. PID 控制[J]. 自动化仪表, 2004, 25(4): 3-8.
Wang Lei, Song Wenzhong. PID control[J]. Process Automation Instrumentation, 2004, 25(4): 3-8. (in Chinese)
- [8] 李尹. PID 控制算法及其在风速控制中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学光学与电子信息学院, 2007.
Li Yin. PID control arithmetic and its application in wind-speed control[D]. Wuhan; School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [9] 李可, 刘旺开, 王浚. 专家—模糊 PID 在低速风洞风速控制系统中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 133(12): 1387-1390.
Li Ke, Liu Wangkai, Wang Jun. Parameters self-tuning fuzzy-PID combined with expert control on wind velocity control system of wind tunnels at home[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 133(12): 1387-1390. (in Chinese)
- [10] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 6 版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
Fei Yetai. Error theory and data processing[M]. 6th ed. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)

作者简介:

李红才(1981—),男,博士研究生。主要研究方向:航空发动机热端部件冷却。

朱惠人(1958—),男,教授,博导。主要研究方向:航空发动机及燃气轮机热端部件的先进冷却技术。

(编辑:张杰)