

逆波兰式优化算法在航空发动机测试系统中的应用

哈 圣, 陈震宇, 徐 昊, 朱赤洲
(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 为了适应新一代航空发动机测试系统的发展要求, 提高测试系统对计算参数的处理能力, 结合航空发动机测试系统的自身特点, 将逆波兰式算法应用到测试系统的参数计算中, 并对逆波兰式算法进行改进和优化。结果表明: 逆波兰式算法可提高发动机测试系统代码的可移植性与重复性, 优化后的逆波兰式算法可提高测试系统的容错性、计算结果准确性, 从计算程序的运行时间来看, 优化后的算法较未优化算法的计算效率提高 20%~40%。

关键词: 测试系统; 逆波兰式算法; 航空发动机

中图分类号: V219

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.01.013

Application of Optimal Reverse Polish Algorithm in Aeroengine Test System

HA Sheng, CHEN Zhen-yu, XU Hao, ZHU Chi-zhou

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to meet the development requirements of the new generation of aeroengine test system and improve the processing ability of the test system to calculate the parameters, the reverse Polish algorithm was applied to the parameter calculation of the test system according to the characteristics of the aeroengine test system. The reverse Polish algorithm was improved and optimized. The results show that the reverse Polish algorithm can improve the portability and repeatability of engine test system codes. The optimized reverse Polish algorithm can improve the fault tolerance and accuracy of calculation result of the test system. According to the running time of the program, the optimized algorithm improves the calculation efficiency by 20%~40% comparing with the unoptimized algorithm.

Key words: test system; reverse polish algorithm; aeroengine

0 引言

在航空发动机试验过程中, 对于发动机性能考核常会涉及到截面参数、修正系数以及一些直接或间接测量参数的计算^[1-3]。伴随试验的开展, 需要布置大量、多种测试仪器以获取各类数据, 有时 1 次上台测试项目超过 1000 点, 对于测试系统的测试性能要求较高^[4]。目前, 对于中国航空发动机测试系统或数据采集系统普遍采用给定固定通道以底层代码写入计算公式的方式来得出计算结果, 代码的通用性、复用性与可移植性较低。随着中国航空发动机研制能力的不断提高, 航空发动机测试系统测量参数的数量也越来越多, 上台准备周期逐渐缩短, 这种方式的弊端也愈发明显。

国外在测试系统的通用性研制上进行了深入探究, 如美军下一代通用测试标准 NxTest^[5]、法宇航研制的通用自动测试平台^[6]。而中国专家、学者主要对航空发动机测试系统测量方式、数据图形化显示、框架结构等方面进行深入研究, 如李富亮^[7]关于全流程参数试验设计以及数据处理方式的研究, 在测试系统的通用技术研究方面还稍显不足。虽然张毫等^[8]对测试系统的通用设计基于动态链接库(DLL)技术使得测试系统整体通用性得到提升, 但仍避免不了重新编写程序代码, 使得测试系统程序的通用性、复用性与可移植性难以得到保证。

本文结合航空发动机测量参数常用的计算方法与表述形式, 利用逆波兰式算法对字符表达式的功能

收稿日期: 2019-04-12 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 哈圣(1993), 男, 硕士, 主要从事航空发动机测试、性能研究工作; E-mail: HS_Smith@163.com。

引用格式: 哈圣, 陈震宇, 徐昊, 等. 优化逆波兰式算法在航空发动机测试系统中的应用[J]. 航空发动机, 2021, 47(1): 67-71. HA Sheng, CHEN Zhenyu, XU Hao, et al. Application of optimal reverse polish algorithm in aeroengine test system[J]. Aeroengine, 2021, 47(1): 67-71.

进行计算,满足用户实现对测量数据的复杂运算以及分析需求^[9],并对逆波兰式算法进行优化处理提高测试系统数据处理能力。

1 逆波兰表达式原理及应用

1.1 逆波兰表达式转化与计算

逆波兰表达式又称后缀表达式,由波兰逻辑学家 Lukasiewicz J 提出。其主体思想在于将复杂的中缀表达式通过既定的运算符与函数优先级比较,以适合于计算机存储的进栈、出栈方式转化为适合计算机计算的后缀表达式^[10-12]。逆波兰表达式的计算方式为:在扫描后缀表达式过程中,如果当前字符为变量或数字,则压栈;如果是运算符或函数,则根据运算符的运算目数或函数所需变量数弹出对应数量的元素,对弹出元素进行相应运算后,将计算结果入栈。经过几轮进栈与出栈后,栈中所存元素为相应中缀表达式的计算结果。

将中缀表达式转换为逆波兰表达式的一般算法为:

(1)分别建立1个栈存储单元与1个后缀表达式存储单元,其中栈存储单元用来存放运算符,栈中元素遵循栈底至栈顶优先级逐渐递增原则;

(2)扫描中缀表达式的字符串,从第1个字符串开始判断,若该字符是数字,对该数字进行正负数判断,若为负数,在该负号前添加“0”字符处理^[13],直至中缀表达式扫描结束;

(3)扫描处理过正负号的新中缀表达式,若该字符是数字,将该数字字符串写入已创建好的后缀表达式存储单元,并添加数字标识;

(4)若该字符为运算符且非右括号,将该运算符与栈顶元素进行优先级比较,若该运算符优先级高于栈顶运算符则将该运算符入栈,否则将栈顶元素出栈,写入后缀表达式存储单元,并添加运算符标识;

(5)若该字符为右括号“)”,则将自栈顶开始弹出栈中元素,直至该元素为左括号“(”,并将出栈元素依次写入后缀表达式存储单元中,并添加运算符标识,但此过程不将括号字符写入后缀表达式存储单元中;

(6)重复(3)~(5)的步骤,直至全部扫描完中缀表达式,确定所有字符都得到正确处理。

逆波兰表达式的计算,即对后缀表达式进行计算,基本算法为:(1)对存储在后缀表达式存储单元中的各元素进行扫描;(2)对扫描的元素进行判断,若遇到非数字运算符或函数时提取该非数字元素前相应

目数或个数的数字元素进行运算并将计算结果存入该计算位置;(3)重复(1)、(2)步骤,直到所有非数字元素都进行了相应计算后,后缀表达式存储单元存储的数字即为最终计算结果。

1.2 逆波兰式算法在发动机测试系统中的应用

1.2.1 发动机测试系统逆波兰式算法功用分析

在航空发动机测试系统中需要在试车现场对发动机测量参数进行计算或采用较为简单的分析算法来反映发动机的整机性能。通常采用平均线法^[14]对截面参数进行平均值计算来反映某一特定截面工作时的宏观性能,并且还会对测量参数做一些基本计算,因此需要具备最基本的加、减、乘、除、幂运算、指数计算等。为了解决某些测量参数测量范围较宽,而传感器和显示器分辨率一定造成测量精度降低的问题,发动机测试系统往往需要具备自动切换功能^[15],一般在使用过程中采用并、串联不同测量范围仪器或仪表的方式来达到对发动机不同状态的测量精度要求^[16],例如对燃油流量的测量采用如图1所示结构,通过对 W_1 、 W_2 、 W_3 不同量程的流量计进行并串联以及 K_1 、 K_2 这2个电磁阀在不同状态的先后打开来实现对燃油流量测量的自动切换功能。因此算法本身需要具备比较运算来对开关量进行判断的同时进行逻辑运算。

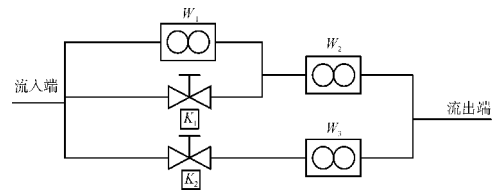


图1 燃油流量测量系统

基于数据的快速交换原则,航空发动机测试系统对于开关量的数据显示往往通过对1个单精度浮点数进行二进制转化,将二进制的不同高低位数值作为各开关量的数值,因此算法需要具备位运算符计算的功能。

在测试系统中加入三角函数、反三角函数等较为普遍的计算功能进行扩展。此外,为了提高测试系统测试结果的准确度和便于了解发动机的工作特性,针对某些部件温度场变化较大的特性,对发动机工质测量加入变比热计算、焓值计算等自定义函数功能^[17-20],以满足复杂测试系统对参数的计算要求。在测试系统中逆波兰式算法运算优先级定义见表1。表中,“!”表示不等号,count为栈中存储的左括号“(”数量。

表 1 运算优先级

运算类别	优先级	运算符与函数
括号	10+count*10	(、)
单目运算	5+count*10	sin、cos、逻辑非、函数等
	4+count*10	逻辑与、或
双目运算	3+count*10	*、/、^、\、取余、位运算
	2+count*10	+、-
	1+count*10	>、<、=、>=、<=、!

1.2.2 算例

为了检验第 1.1 节中的算法逻辑正确性及发动机测试系统算法功用使用情况,以空气流量计算为例,计算过程采用变比热计算,计算方法采用的参数公式见表 2。表中“sqr”为平方根运算符; k 为气体比热比;“^”为幂运算符; R 为气体常数; P 为气体静压; P_t 为气体总压; T_t 为气体总温; A 为气体流经截面面积。

表 2 参数计算公式

参数	计算公式
气体常数 K	$\text{sqr}(k/R*((2/(k+1))^{((k+1)/(k-1))}))$
速度因数 λ	$\text{sqr}((1-(P/P_t)^{((k-1)/(k+1))})*((k+1)/(k-1)))$
流量函数 $q(\lambda)$	$((k+1)/2)^{(1/(k-1))}*\lambda*(1-(k-1)/(k+1))*\lambda^2*(1/(k-1))$
流量 W_a	$K*P_t/\text{sqr}(T_t)*A*q(\lambda)$

为了方便观察和检验逆波兰式算法计算的准确性,将测量数值和变比热计算结果代入公式,计算结果如图 2、3 所示。

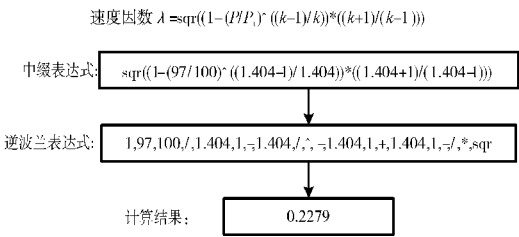


图 2 速度因数计算算例

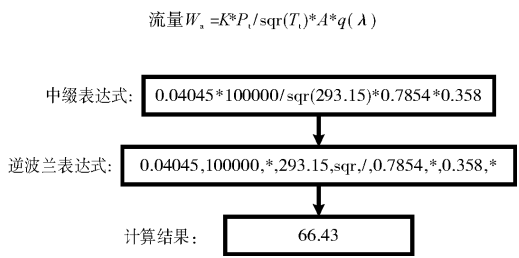


图 3 流量计算算例

2 算法优化设计

2.1 算法容错性提升

航空发动机测试系统对于算法的稳定性要求较高,为避免在输入中缀表达式的过程中出现输入错误而导致逆波兰式算法对表达式语法上的识别错误,对逆波兰式算法所计算的中缀表达式进行核查。核查项包括以下几项:

(1)中缀表达式的完整性核查,主要包括对空格字符的移除和无法识别的运算符及函数关键字的提示功能。

(2)运算功能正确性核查,包括运算符使用规范性,如除零、方根为负、位运算溢出等检查及定义函数的使用错误提示功能。

2.2 计算结果准确性保证

在航空发动机试验过程中,传感器大多处在高温、高压并伴有一定振动的环境中,并且为保证测量结果的准确性,测量设备往往位于测试点附近,受试车间恶劣环境及受感元器件所处的高负荷影响,有时会使测量线路损坏,包括传感器、测试线路及测量设备受损等,造成个别测点的测量结果有误。某些重要测点受发动机结构影响,测点较少,需要保持测点测量值的有效性,并且对某些间接测量量影响较大。因此引入测点准确性功能函数

Boolean Check(参数名称,阈值) (1)

对 Check 函数中的参数名称进行标准差计算,通过比较标准差与阈值测点判断是否异常。

考虑到在试验过程中测量通道改变会引起计算表达式因疏忽未能将与之关联的间接测量量计算通道号完全更改,引起测量结果有误。为此,加入按名称查找通道号的功能,以适应因通道更改引起部分间接测量量计算结果有误的情况,并减少试验人员工作量。

2.3 算法计算速度优化

2.3.1 算法计算速度优化原理

航空发动机测试系统在不同试车阶段对数据量的处理能力要求不同,虽然引入逆波兰式算法提高了测试系统的通用型与试验过程中的维护性,但该算法对于后缀表达式的计算时间会受到后缀表达式长度的限制,因此有效地控制后缀表达式长度对于提高发动机测试系统的计算效率有关键作用。本节将对逆波兰式算法中缀转后缀机理进行研究,通过缩短后缀表

达式长度达到优化算法的目的。

通过人为添加标识符,对航空发动机计算参数的表达式中的一些常数项或只需计算1次的部分表达式进行预先计算,将计算结果放到原后缀表达式中,缩短了每次计算的后缀表达式的长度,减少了后缀表达式中计算运算符数量。

为了提高标识符内中缀表达式的计算速度,在分析第1.1节中的逆波兰表达式计算原理后,发现在后缀表达式中运算符或函数的排列顺序取决于栈存储单元弹出元素的先后顺序,而预先计算标识符内的元素为一次计算项,可以在栈存储单元中的元素出栈时对后缀表达式存储单元中的元素进行相应功能的计算,并将计算结果存入后缀表达式存储单元,经过几次计算后后缀表达式存储单元内的元素为计算结果,省略对标识符内的中缀表达式转化为后缀表达式过程和对标识符内后缀表达式的计算过程,达到即弹即算的效果。

优化后的逆波兰式算法如图4所示。图中逆波兰表达式的转换和具体计算过程参考第1.1节中的算法。

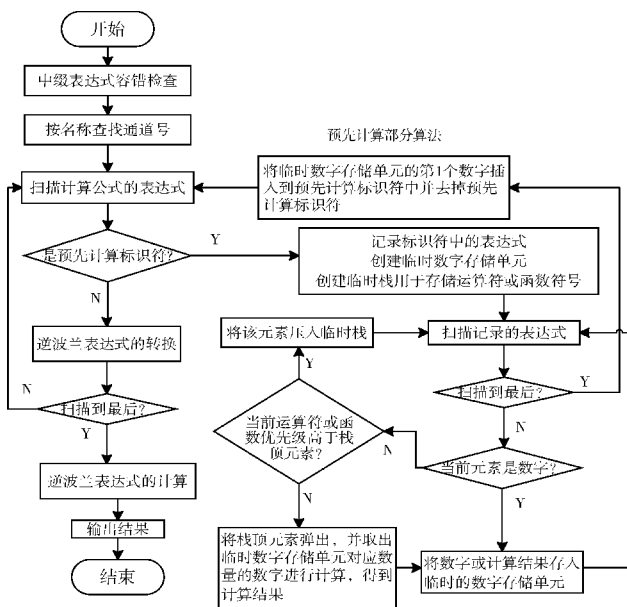


图4 优化后的逆波兰式算法

2.3.2 优化算法与逆波兰式算法的对比

优化算法由于添加了预先计算标识符,减少了逆波兰表达式的计算长度。为比较优化前、后算法的计算速度,考虑发动机测试系统计算表达式中无常数项或存在多次计算项,由于添加预先计算部分代码而引

起的计算机编译时间增加给测试系统计算参数变量带来的时间增加的可能性,对同一计算表达式采用3种方法计算:逆波兰式算法;未加预先计算标识符优化算法;对部分常数项添加预先计算标识。

本文给出1组较为复杂的算例进行说明,对该逆波兰表达式进行100万次计算,计算结果如图5所示,图中“{}”为预先计算标识符。

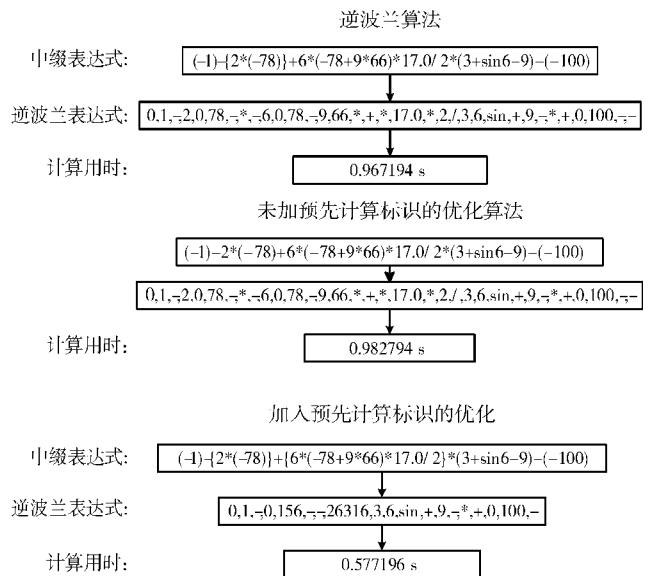


图5 算例对比

从图中可见,优化后的算法所增加的代码编译时间并未对算法本身造成过多影响,而添加了预先计算标识符的优化算法,由于预先计算了常数项及一次计算项,使得逆波兰表达式计算项目减少。从计算程序的运行时间来看,优化后算法较未优化前的计算效率提高20%~40%。

3 结论

利用逆波兰式算法对表达式计算的灵活性,提高了航空发动机测试系统对多参数计算的能力,以及测试系统代码的通用性、复用性与可移植性。得到如下结论:

(1)基于测试系统对参数计算方法与逆波兰式算法的基本原理,得出运算符种类与优先级,确立了逆波兰在航空发动机测试系统中的基本算法,并通过算例验证了逆波兰式算法的可行性与正确性。

(2)增加算法的容错性与计算结果的准确性,提高了测试系统的稳定性。

(3)根据逆波兰式算法的计算机理,对计算参数

中的一些常数项和一次计算项,通过预先计算标示符中的算式来缩短需要实时计算的逆波兰表达式长度,达到优化算法的效果,并通过算例表明该优化算法的可行性。

目前该逆波兰式优化算法已在发动机测试系统中应用,使测试系统的试验效率和软件的维护性得以提高。

参考文献:

- [1] 李富亮,雷勇. 航空发动机全流程参数试验中温度和压力测量综述[J].机械设计与制造,2010(3):255-256.
LI Fuliang,LEI Yong. Review on the measurement of temperature and pressure in aero engine station parameters test [J]. Machinery Design and Manufacture,2010(3): 255-256. (in Chinese)
- [2] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005:39-84.
ZHANG Baocheng. Experiment and testing technology of aeroengine [M]. Beijing:Beihang University Press,2005:39-84.(in Chinese)
- [3] 刘志友,马前容,师伟. 改善高空试验中发动机性能参数不确定度的方法探究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2011,24(1):1-7.
LIU Zhiyou,MA Qianrong,SHI Wei. Methods of aero-engine performance parameter uncertainty improvement in simulated altitude test[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2001, 24(1):1-7. (in Chinese)
- [4] 王强,刘宜胜,方杰,等. 航空发动机研发过程中的固有测试性设计[J]. 机械工程师,2018,6:126-129.
WANG Qiang,LIU Yisheng,FANG Jie,et al. Inherent testability improvement methods for aeroengine development[J]. Mechanical Engineer, 2018,6:126-129. (in Chinese)
- [5] Orlet J L , Murdock G L. CASS upgrade COSSI-a systematic approach to incorporating NxTest technology into legacy military ATE [C]// Autotestcon Proceedings, IEEE, 2002:20-33.
- [6] Linton M,Charbonnier P. Honeywell STS2000 and aerospaciale ATEC series 6 new generation of avionics test systems[J].Autotestcon-IEEE, 1993,1(1):595.
- [7] 李富亮. 航空发动机全流程试验方案设计及数据处理平台的研制[D].西安:西北工业大学,2010.
LI Fuliang. Scheme design of aero-engine full flow test and develop of data processing platform[D].Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2010.(in Chinese)
- [8] 张毫,孙永飞,熊进星.航空发动机燃烧室试验通用测试系统设计与应用[J].航空发动机,2019,45(4):67-70.
ZHANG Hao,SUN Yongfei,XIONG Jinxing. Design and application of aeroengine combustion chamber test general measurement system [J]. Aeroengine,2019,45(4):67-70.(in Chinese)
- [9] 曾水根,丁俊健,刘万斌. 基于逆波兰算法实现的电力故障数据分析公式编辑器[J].电气安全,2016(14):56-62.
ZENG Shuigen,DING Junjian,LIU Wanbin. Power fault data analysis formula editor based on reverse Polish algorithm [J].Electric Safety, 2016(14):56-62.
- [10] 潘子杰. 基于开放式数控系统的软 PLC 的研究[D].北京:北京工业大学,2002:44-45.
PAN Zijie. Soft PLC research based on open numerical control system [D]. Beijing:Beijing University of Technology,2002:44-45. (in Chinese)
- [11] 牛云. 先进飞机电气系统计算机控制与管理系统主处理机关键技术研究[D].西安:西北工业大学,2006.
NIU Yun. Reaserch on key technologies of advanced aircraft power system processor [D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University, 2006.(in Chinese)
- [12] 郭群. 逆波兰式探微 - 后缀表达式的求法及其适用情况比较[J].黑龙江科技信息,2007(16):36,262.
GUO Qun. The method of calculation inverse polish definite-suffix expression and its application comparison[J]. Heilongjiang Science and Technology Information,2007(16):36,262. (in Chinese)
- [13] 苏鹰,赵凌. 动态表达式的解析和计算[J].办公自动化,2012,20:60-62.
SU Ying,ZHAO Ling. Dynamic expression parsing and calculation[J]. Office Informatization,2012,20:60-62.(in Chinese)
- [14] Hirsch C,Denton J.D. Propulsion and energetics panel working group 12 on through flow calculations in axial turbomachines [R]. AGARD-AR-175.
- [15] 何金田. 自动检测技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2006:19-21.
HE Jintian. Automatic measurement technology [M].Xi'an:Xi'an University of Electronic Science and Technology Press,2006:19-21. (in Chinese)
- [16] 陈益林.航空发动机试车工艺[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010:55-63.
CHEN Yilin. Aeroengine test technology [M]. Beijing:Beihang University Press,2010:55-63. (in Chinese)
- [17] 王振华,王亮.航空发动机试验测试技术发展探讨[J].航空发动机,2014,40(6):47-51.
WANG Zhenhua,WANG Liang.Development of aeroengine testing measurement technology [J]. Aeroengine,2014,40 (6):47-51. (in Chinese)
- [18] 张世铮,纪军. 变比热气体和变比热有离解气体热力学过程的计算[J].工程热物理论,1996,17(2):134-137.
ZHANG Shizheng,JI Jun. Calculation of thermodynamic of variable specific heat gas and variable specific heat dissociated gas[J].Journal of Engineering Thermophysics, 1996,17(2):134-137. (in Chinese)
- [19] 王占学,王建峰,唐狄毅.变比热容对喷管流场和性能影响的计算[J].推进技术,2000,21(4):60-62.
WANG Zhanxue,WANG Jianfeng,TANG Diyi. Calculation for effect of variable specific heat capacity on nozzle flow field and performance [J].Journal of Propulsion Technology,2000,21(4):60-62.(in Chinese)
- [20] 童凯生.航空涡轮发动机机性变比热计算方法[M].北京:航空工业出版社,1991:9-18.
TONG Kaisheng. Calculation method of performance with variable specific heat for aviation turbine engine [M].Beijing:Aviation Industry Press,1991:9-18.(in Chinese)

(编辑:刘 亮)