

# 32 位定点运算数学库 IQmath 在航空发动机 FADEC 系统中的应用

席伟弟, 李伟刚, 李鹏杰

(中国航发控制系统研究所, 江苏无锡 214063)

**摘要:**为提高航空发动机 FADEC 系统定点 CPU 的计算效率和计算精度, 针对实际工程应用中的数学运算的方法展开讨论, 分析了定点数运算和浮点数运算在计算精度和运行效率方面存在的差异。参考 TI 公司的设计理念, 自行设计了支持统一定点算法和可变定点算法的 32 位定点运算数学库 IQmath。在国内发动机控制领域不再依赖国外的库函数, 掌握了 32 位定点数学库的源代码, 并在实际项目中应用了 IQmath 数学库。试验结果表明: IQmath 数学库的应用提高了定点 CPU 数学运算的精度和效率, 完美实现了预定的控制算法。

**关键词:** 定点运算数学库; 全权限数字电子控制; 定点数; 浮点数; 航空发动机

**中图分类号:** V233.7      **文献标识码:** A      **doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2017.05.004

## Application of 32 bit Fixed-point Arithmetic Library IQmath in FADEC System of Aeroengine

XI Wei-di LI Wei-gang LI Peng-jie

(AECC Aero Engine Control System Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China)

**Abstract:** In order to improve the computational efficiency and accuracy of the fixed-point CPU of Aeroengine FADEC system, the mathematical operation method in practical engineering application was discussed and the differences between the fixed-point operation and the floating-point operation in the calculation accuracy and the running efficiency were analyzed. Reference to TI's design concept, arithmetic library IQmath was designed, which support the unified fixed-point algorithm and variable fixed-point algorithm 32-bit fixed-point. In the field of domestic engine control is no longer dependent on foreign library functions, the 32-bit fixed-point mathematical library of the source code was mastered, and the IQmath library was applied in actual project. The results show that the application of IQmath library improves the accuracy and efficiency of fixed-point CPU mathematical operation, and realizes the predetermined control algorithm.

**Key words:** IQmath; FADEC; fixed-point numbers; floating-point numbers; aeroengine

## 0 引言

随着航空发动机技术和计算机技术的快速发展, 发动机控制系统由早期的机械液压式控制系统发展到现在的全权限数字电子控制(FADEC)系统, 一方面使航空发动机性能有了很大提高, 另一方面也对发动机控制系统的可靠性提出了更高要求。对控制系统的实时性和精确性有很高要求。对于定点 CPU, 国外已经掌握了定点数学运算库的源代码, 而在国内普遍使

用的是运算库的动态连接库, 对于源代码不可见, 运算机理模糊。

在某型发动机 FADEC 系统中, 数字电子控制器使用的 CPU 芯片不支持浮点运算, 而实际应用的数据为浮点数, 所以要将浮点数转化为定点数之后才能运算, 这就涉及到数的定标问题。本文针对 FADEC 系统嵌入式软件定点 CPU, 自行设计了 1 种 32 位定点数学库 IQmath, 掌握了定点运算库的源代码及运算机理。在实际项目应用中不但提高了定点 CPU 的

收稿日期: 2017-03-11

作者简介: 席伟弟(1982), 男, 硕士, 工程师, 主要从事航空发动机数控系统控制软件的研究与应用工作; E-mail: 275392963@qq.com。

引用格式: 席伟弟, 李伟刚, 李鹏杰. 32 位定点运算数学库 IQmath 在航空发动机 FADEC 系统中的应用[J]. 航空发动机, 2017, 43(5): 21-25. XI Weidi LI Weigang, LI Pengjie. Application of 32 bit fixed-point arithmetic library IQmath in FADEC system of Aeroengine [J]. Aeroengine, 2017, 43(5): 21-25.

运算效率,又保证了较高运算精度<sup>[4]</sup>。

### 1 定点数概述

定点数是计算机采用的 1 种数的表示方法,参与运算的数的小数点位置固定不变<sup>[4]</sup>,计算机仅仅考虑位。在整数运算中,位的位置表示 2 到 2 的高次幂(从右边开始)。

因此 000000000010000 表示数字 16(2<sup>4</sup>),如图 1 所示。从定点数的起点可以观察到,有个隐含的十进制点(称为基点)位于最右边位值的右边。

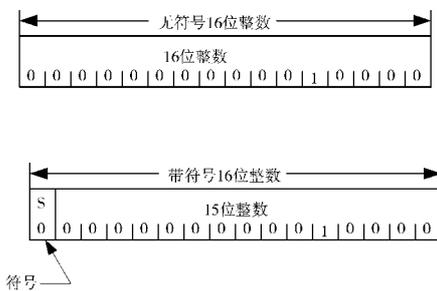


图 1 有符号和无符号 16 位整数

对于同样的 16 位数,程序员决定将基点放在第 5 位和第 6 位之间,使最右边位表示 2<sup>-5</sup>。000000000010000 现在就不再表示 16,而是 0.5,如图 2 所示。

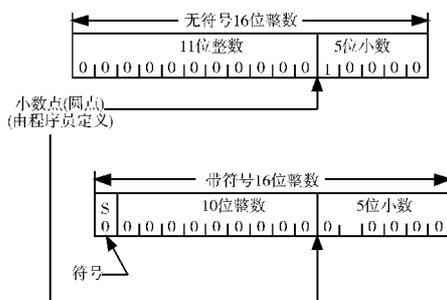


图 2 基点位于第 5、6 位之间的定点数

通过改变基点的位置,程序员可以按比例缩小整数到 1 个小数值。基点的位置规定了程序如何解释 1 个 16 位串。当基点向左移动时,小数变得更加精确,并且数字的全部范围将缩小<sup>[4]</sup>。

为了利用定点运算,需要知道变量的取值范围。定点运算操作通常执行时是快速的,因为大部分微处理器在执行整数操作时性能非常好。性能是以精度和复杂性为代价的。为了提高精度,不得使用更多的位。当使用小的数字时定点运算产生的误差大,而利用大数字时将产生相当好的结果。对于大数字,提高

精度是利用更多位的结果。当数的变化范围小时,定点数工作得非常好<sup>[9]</sup>。

### 2 32 位定点数学库 IQmath 介绍

#### 2.1 32 位 IQ 定点数

32 位 IQ 定点数,是指选用 32 位有符号数作为基础,由程序员自行约定小数点位置的数据表示方法。小数点的位置不同,32 位 IQ 定点数能表示的范围不同,数据精度也不同。不同位置小数点的数据类型用 IQ<sub>n</sub> 表示,其中 n 从 0 取到 31<sup>[10]</sup>。IQ 类型的表示范围和数据精度见表 1。

表 1 IQ 类型的范围和精度

Data type	Range		Resolution/Precision
	Min	Max	
_iq30	-2	1.99999999	0.00000001
_iq29	-4	3.99999998	0.00000002
_iq28	-8	7.99999998	0.00000004
_iq27	-16	15.99999993	0.00000007
_iq26	-32	31.99999985	0.00000015
_iq25	-64	63.99999970	0.00000030
_iq24	-128	127.99999940	0.00000060
_iq23	-256	255.99999981	0.00000119
_iq22	-512	511.99999762	0.00000238
_iq21	-1024	1023.99999523	0.00000477
_iq20	-2048	2047.99999046	0.00000954
_iq19	-4096	4095.99998093	0.00001907
_iq18	-8192	8191.99996185	0.00003815
_iq17	-16384	16383.99992371	0.00007629
_iq16	-32768	32767.99984741	0.00015259
_iq15	-65536	65535.99969482	0.00030518
_iq14	-131072	131071.99938965	0.00061035
_iq13	-262144	262143.99977930	0.00122070
_iq12	-524288	524287.99755859	0.00244141
_iq11	-1048576	1048575.999511719	0.00488281
_iq10	-2097152	2097151.999023437	0.00976563
_iq9	-4194304	4194303.998046875	0.01953125
_iq8	-8388608	8388607.996093750	0.03906250
_iq7	-16777216	16777215.992187500	0.07812500
_iq6	-33554432	33554431.984375000	0.15625000
_iq5	-67108864	67108863.968750000	0.31250000
_iq4	-134217728	134217727.937500000	0.62500000
_iq3	-268435456	268435455.875000000	1.25000000
_iq2	-536870912	536870911.750000000	2.50000000
_iq1	-1073741824	1073741823.500000000	5.00000000

在实际应用中,可采用 2 种 32 位 IQ 定点数的表示方法。第 1 种方法是在应用中每个数据和公式都可以采用不同的定标方法,即采用 IQn 中的 n 随数据不同而变化<sup>[11]</sup>。第 2 种方法是在应用中每个数据和公式选用统一的定标方法,即采用 IQn 中的 n 是固定不变的。固定的 n 一般被称为 GLOBAL\_Q。在 1 个应用中需要考虑到数据的精度和范围,高精度必然会使数据的范围变小,因此系统设计者必须权衡精度和范围,然后设置 GLOBAL\_Q 的值<sup>[12]</sup>。

### 2.2 IQmath 支持的库函数

本文参考 TI 公司的理念,自行设计了 32 位定点运算数学库 IQmath<sup>[13]</sup>。

32 位定点数学库 IQmath 是高度优化和具有高精度的数学函数库集合。IQmath 库里面包含的函数均采用 IQ 格式定点数作为输入/输出,允许程序设计人员在定点 CPU 上进行浮点算法设计,从而提高运算速度<sup>[14-15]</sup>。

IQmath 定点数学库支持常见的算术运算和数学运算,主要运算介绍如下。

#### 2.2.1 格式转换

IQ ftoIQ (float F)将单精度浮点数转为 IQ 数据;

Float IQtof(IQ A)将 IQn 数据转为单精度浮点数。

#### 2.2.2 算术运算

IQ 定点数的加减法等于整数直接加减;

IQ iqMpy(IQ A, IQ B),乘法函数;

IQ iqDiv(IQ A, IQ B),除法函数;

IQ iqMpy\_Div(IQ A,IQ B),先乘后除函数。

#### 2.2.3 数学运算

IQ iqabs(IQ A),绝对值函数

IQ iqSqrt(IQ A),算术平方根函数。

#### 2.2.4 三角函数运算

IQ iqSin(IQ A),三角正弦函数;

IQ iqCos(IQ A),三角余弦函数;

IQ iqTan(IQ A),三角正切函数;

IQ arcsin(IQ A),反正弦函数;

IQ arccos(IQ A),反余弦函数;

IQ arctan(IQ A),反正切函数。

## 3 应用案例

### 3.1 统一定点算法应用

某型发动机 FADEC 系统中数字电子控制器使

用的定点处理器不支持浮点运算,在程序运行时无法实现小数的操作,所以在计算时必须先把小数转化为整数。采用 IQmath 定点数学库可以将浮点数算法转换为定点数算法,使运算速度明显提高,对强实时性要求的发动机控制系统的设计十分有效。

在某型发动机控软件的开发中,需实现如下控制计算

$$\delta_H = (4.108448 - 0.4549 \times R - 7.62241 \times D_8 + 6.705905 \times D_8^2 - 2.88405 \times D_8^3 + 0.8921 \times D_8 \times R) \times \delta / 5 - a \times \delta \quad (1)$$

$$L_H = 77.3957 + 34.6289 \times D_8 - 66.2703 \times D_8^2 - 112.9121 \times R + 12.1938 \times R^2 + 70.8762 \times D_8 \times R - 16.079 \times D_8^2 \times R^2 + 0.0156 \times \delta - 0.0053 \times \delta^2 - 0.0283 \times D_8 \times \delta - 0.0167 \times D_8^2 \times \delta^2 \quad (2)$$

$$Z_1 = U \times \sin(\delta_H) \times \cos(\theta - 300) + L_H + C \quad (3)$$

$$Z_2 = U \times \sin(\delta_H) \times \cos(\theta - 180) + L_H + C \quad (4)$$

$$Z_3 = U \times \sin(\delta_H) \times \cos(\theta - 60) + L_H + C \quad (5)$$

式中:R 为面积比;a 为某系数;D<sub>8</sub> 为喉道直径,m;δ 为偏转角,(°);θ 为方位角,(°);δ<sub>H</sub> 为调节环与作动筒平面偏转角,(°);L<sub>H</sub> 为水平位移,mm;Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>、Z<sub>3</sub> 为作动筒长度,mm;U 为某修正系数;C 为常数,mm。

该算法要求计算精度高,采用常见的 16 位定点算法很难满足要求,而且整个定点化过程非常复杂,会降低软件的可维护性。经过项目实际应用场景分析及结合图 3 中 IQ 类型数据的范围和精度考量,选用 IQ-math 定点数学库统一定点方式进行算法设计。将 GLOBAL\_Q 统一定义为 19,其软件计算流程如图 3 所示。

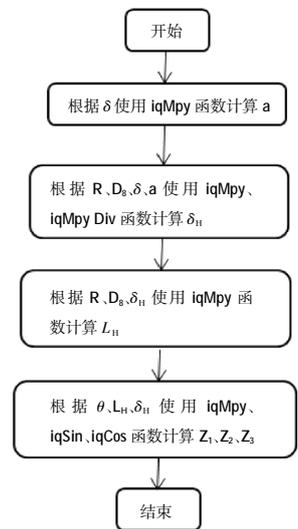


图 3 软件计算流程

IQ 定点算法控制软件配套某型数控系统进行了外场试车,试车数据如图 4 所示。浮点理论计算数据与 IQ 定点计算试验数据对比结果见表 2。

表 2 中 Z<sub>1</sub>IQtof、Z<sub>2</sub>IQtof、Z<sub>3</sub>IQtof 是 θ、δ、D<sub>8</sub> (D<sub>8</sub>=0.584 m) 等输入变量按照 GLOBAL\_Q=19 统一定点算法计算后的结果再经过反定点化为浮点数的结果,

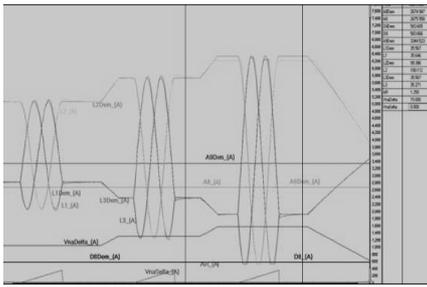


图 4 试验数据

表 2 IQ 定点计算数据与浮点理论计算数据对比

$\theta /$ (°)	$\delta /$ (°)	$Z_1IQtof /$ mm	$Z_2IQtof /$ mm	$Z_3IQtof /$ mm	$Z_1理论 /$ mm	$Z_2理论 /$ mm	$Z_3理论 /$ mm	$Z_1理论$ 偏差/%	$Z_2理论$ 偏差/%	$Z_3理论$ 偏差/%
0	10.0	43.935	86.784	43.935	43.939	86.779	43.933	0.009	0.006	0.005
2.25	10.0	44.915	86.760	42.974	44.920	86.758	42.972	0.011	0.002	0.005
41.25	10.0	63.791	79.694	31.169	63.794	79.687	31.171	0.005	0.009	0.006
98.25	10.0	84.745	54.123	35.794	84.741	54.117	35.793	0.005	0.011	0.003
281.26	10.0	31.161	63.791	79.694	31.158	63.788	79.694	0.010	0.005	0
338.26	10.0	35.786	84.749	54.119	35.786	84.744	54.124	0.000	0.006	0.009
359.26	10.0	43.615	86.780	44.263	43.613	86.775	44.267	0.005	0.006	0.009
39.75	15.0	64.045	89.546	16.930	64.053	89.536	16.935	0.012	0.011	0.030
84.75	15.0	91.581	60.732	18.208	91.578	60.724	18.212	0.003	0.013	0.022
285.76	15.0	15.618	68.389	86.522	15.614	68.386	86.521	0.026	0.004	0.001
333.76	15.0	21.469	94.995	54.056	21.470	94.989	54.065	0.005	0.006	0.017
357.76	15.0	34.138	99.351	37.028	34.138	99.345	37.039	0.000	0.006	0.030
331.51	20.0	6.934	104.374	53.443	6.934	104.368	53.452	0.000	0.006	0.017
355.51	20.0	23.024	111.042	30.677	23.026	111.034	30.686	0.009	0.007	0.029

所有定点计算结果未超过 IQ19 类型数据表示的范围 [-4096,4095.999998093]);  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  理论是同样的输入数据按照浮点数计算得出的结果。浮点理论和统一定点算法的计算结果最大偏差为 0.03%，完全满足客户的计算精度偏差在 0.05% 以内的要求。

### 3.2 可变速点算法应用

某型 FADEC 系统中对某信号有超前滞后校正要求

$$H(s) = \frac{bs+1}{as+1} \quad (6)$$

式中:  $b$  为超前校正系数, 其取值根据传感器时间常数确定, 用于修正传感器采集的延迟;  $a$  为滞后校正系数, 由发动机特性决定。

对于上述信号超前滞后校正算法采用 IQmath 定点数学库 GLOBAL\_Q=19 统一定点算法, 当输入数据经过校正处理后超过 4095.999998093, 计算结果出现溢出翻转问题, 数据见表 3。表 3 中统一定点算法超前滞后校正结果由于出现计算溢出问题, 导致与浮点理论超前滞后校正结果偏差较大, 不满足设计初衷, 严重影响发动机控制效果和安全。

表 3 统一定点 IQ 数据(GLOBAL\_Q=19)

输入的浮点数	统一定点校正 后 IQ 结果	统一定点校正后 IQ 值反定点化为浮点数	校正后浮点数 理论值	绝对值偏差 / %
930.0	487587840	930.000	930.000	0
935.0	562480447	1072.846	1072.846	0.00001
936.0	577527388	1101.546	1101.546	0.00003
926.0	425071630	810.760	810.761	0.00012
925.0	411952129	785.697	785.737	0.00513
936.3	583455972	1112.854	1112.854	0.00002
1400.0	-403031376	-768.721	14354.976	105.35509
1401.0	-353067667	-673.423	13984.928	104.81535

同样的输入数据及超前滞后校正系数, 采用可变速点算法就解决了计算溢出问题。数据定标为 IQn ( $n$  可变, 暂取  $n=12$ ; 数据范围为 [-524288, 524287.999755859]), 输入数据经过超前滞后校正处理后未出现超过 IQ12 类型数据范围的问题, 数据见表 4。表 4 中浮点理论超前滞后校正结果与可变速点算法超前滞后校正结果最大偏差为 0.03797%, 满足工程应用中偏差在 0.05% 以内的要求。

表 4 可变速点 IQ 数据(n=12)

输入的浮点数	统一定点校正 后 IQ 结果	统一定点校正后 IQ 值反定点化为浮点数	校正后浮点数 理论值	绝对值偏差 / %
930.0	3809280	930.000	930.000	0.00000
935.0	4394511	1072.888	1072.846	0.00394
936.0	4512134	1101.595	1101.546	0.00443
926.0	3320796	810.741	810.761	0.00242
925.0	3218215	785.697	785.737	0.00513
936.3	4558397	1112.890	1112.854	0.00321
1400.0	58814299	14358.960	14354.976	0.02775
1401.0	57304016	13990.238	13984.928	0.03797

## 4 结束语

本文自行设计的 32 位定点运算数学库 IQmath, 不仅在国内发动机控制领域掌握了 32 位定点数学库的源代码, 不再依赖国外的库函数, 而且成功地应用于航空发动机 FADEC 系统嵌入式控制软件中。此外 IQmath 数学库的统一定点算法和可变速点算法选择灵活, 具有极高的工程应用价值, 可推广应用到其他行业控制领域中。

### 参考文献:

[1] 段彬, 孙同景, 李振华, 等. 快速浮、定点 PID 控制器 FPGA 的研究

- 与实现[J].计算机工程与应用,2009,45(36):202-206.
- DUAN Bin,SUN Tongjing,LI Zhenhua,et al. Research and application on fast floating and fixed point PID controllers on FPGA[J].Computer Engineering and Applications,2009,45(36):202-206.(in Chinese)
- [2] 范啸涛,季光明,何永斌. 计算机浮点数算术运算的舍入误差研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2005,32(2):213-216.
- FAN Xiaotao,JI Guangming, HE Yongbin. Rounding error study of calculator floating-point numbers arithmetic operation [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2005,32(2):213-216. (in Chinese)
- [3] 张宗杰,张明亮. C语言中浮点数的存储格式及其有效数字位数[J].计算机与数字工程,2006,34(1):84-86,90.
- ZHANG Zongjie,ZHANG Mingliang. Storage format of a binary floating-point number and its bits of decimal significant digits[J].Computer&Digital Engineering,2006,34(1):84-86,90. (in Chinese)
- [4] 何克晶. 科学计算浮点数据的高性能无损压缩 [J]. 计算机学报,2010,33(6):966-976.
- HE KeJing. High performance lossless compression of scientific floating data [J]. Chinese Journal of Computers,2010,33 (6):966-976. (in Chinese)
- [5] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). IEEE 754-1985: IEEE Standard for floating-point arithmetic[S].Microprocessor Standards Committee,1985.
- [6] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). IEEE 754-2008: IEEE Standard for floating-point arithmetic[S].Microprocessor Standards Committee,2008.
- [7] 邵正芬. 最佳精度定点运算的FPGA实现 [J]. 通信技术,2009,42(7):279-281.
- SHAO Zhengfen. FPGA implementation of best-precision fixed-point algorithm[J]. Communications Technology,2009,42(7):279-281. (in Chinese)
- [8] Texas Instruments Incorporated. TMS320C28x Assembly language tools user's guide[OL]. [2006-03]. <http://www.docin.com/p-30611705.html>
- [9] 徐彦凯,双凯. 提高定点精度的FPGA信号处理算法[J]. 计算机工程与科学,2012,34(9):197-200.
- XU Yankai, SHUANG Kai. An algorithm of increasing fixed-point accuracy for signal processing systems with FPGA[J]. Computer Engineering&Science,2012,34(9):197-200.(in Chinese)
- [10] Texas Instruments Incorporated. Module user's guide C28x foundation software [OL]. [2008-01-07]. <http://www.doc88.com/p-241831099821.html>
- [11] 谷海涛,颜湘武,于世涛. 新型电机控制芯片TMS320F2812[J].微电机,2005,38(2):53-56.
- GU Haitao, YAN Xiangwu, YU Shitao. A new chip for motor control-TMS320F2812[J]. Servo Technique,2005,38(2):53-56. (in Chinese)
- [12] 张锐. TMS320F2812混合编程的研究与应用[J].煤炭技术,2008,27(1):126-128.
- ZHANG Rui. Research and usage of TMS320F2812 mixed programming[J]. Coal Technology,2008,27(1):126-128. (in Chinese)
- [13] 彭志明,李琳. 基于IQmath库的定点DSP算法设计[J].新器件技术,2010(9):39-41.
- PENG Zhiming, LI Lin. Fixed point DSP algorithm based on IQmath library[J].New Product & Technology, 2010(9):39-41. (in Chinese)
- [14] 魏光,裴郡,林宗宏,等. IQmath在双体船航行控制器设计中的应用[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2015,37(2):47-51.
- WEI Guang,PEI Jun,LIN Zonghong,et al. Application of IQmath in design on navigation controller of catamaran [J].Journal of Wuhan(Information & Management Engineering),2015,37(2):47-51. (in Chinese)
- [15] 李翰麟,潘厚宏,王涛,等. IQmath在基于PWM实现的D/A转换调试中的应用 [J]. 重庆工学院学报(自然科学版),2009,23(8):139-143.
- LI Hanlin,PAN Houhong,WANG Tao,et al.Applications of IQmath in PWM-based D/A conversion debugging [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science),2009,23 (8):139-143. (in Chinese)

(编辑:李华文)