



# AN1292 调整指南

本文档介绍了使用 **AN1292 《利用 PLL 估算器和弱磁技术 (FW) 实现永磁同步电机 (PMSM) 的无传感器磁场定向控制 (FOC) 》 (DS01292A\_CN)** 中所述的算法来运行电机的分步过程。

### 1.1 设置软件参数

userparms.h 文件中定义了所有的主要可配置参数。使用 tuning\_params.xls Excel® 电子表格（见图 1-1）将参数修改为内部数值格式。此文件包含在 AN1292 归档文件中，可以从 Microchip 网站（[www.microchip.com](http://www.microchip.com)）下载此文件。

将电机和硬件信息输入到此电子表格中之后，需要根据下面介绍的步骤，将计算出的参数输入到 `userparms.h` 头文件中。

图 1-1: tuning params.xls

Input parameters			Output parameters				
Peak voltage	24 V		NORM_VOLTAGE_CONST (U0)	0.000406			
Peak current	5 A		<b>NORM_CURRENT_CONST (I0)</b>	<b>0.000153</b>			
PWM Period (Ts)	0.000050 s		NORM_OMEGA_CONST (W0)	0.104720			
Dead time	0.000002 s						
Pole pairs	5 -						
Stator resistance (Rs)	2.67 Ohm		<b>NORM_RS</b>	32886		<b>Predivision</b>	
Stator inductance (Ls)	0.00192 H		<b>NORM_LSDTBASE</b>	472965		<b>2</b>	16443
Voltage constant (Kf)	7.24 Vp/KRPM		<b>NORM_INVKFIBASE</b>	15912		<b>256</b>	1848
Nominal speed (NOMINAL_SPEED_RPM)	2800 RPM		<b>NORM_DELTAT</b>	<b>1790</b>		<b>2</b>	7956
Maximum speed (MAXIMUM_SPEED_RPM)	5500 RPM						
			D_ILIMIT_HS	1502			
			D_ILIMIT_LS	8117			
	Inverter parameter						
	Motor parameter						
	Constant to set in "userparms.h"						
<b>Motor Identification</b>							
Hurst NTDynamo Brushless							
DMB0224C10002 CL B 16208							
24VDC 1.00 Amp B6293							
Hurst Mfg., Princeton, IN							

**第1步——填写 tuning\_params.xls Excel 电子表格中的以下参数:**

a) 峰值电压

**Peak Voltage** 表示直流链路电容上的峰值电压。它还表示直流电源连接到直流链路时的直流电压本身。如果从单相整流桥提供直流链路，则交流峰值电压将与整流器连接：

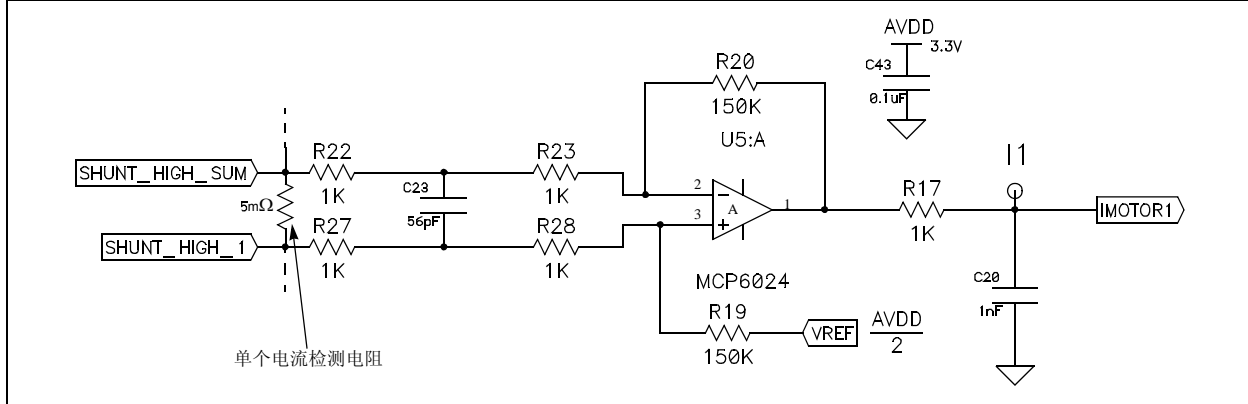
$$V_{ACpeak} = V_{ACrms} \cdot \sqrt{2}$$

演示软件中使用了一个 **24 VDC** 电源，因此 **Excel** 电子表格中包含相应的值。如果您要使用高电压 **PMSM**，则 **115 VAC** 的峰值电压为 **163V**。

## b) 峰值电流

*Peak current* 代表可以在内部表示的电流最大实际值，它取决于采集模块。考虑 ADC 的最大输入为 3.3V，采集电路的增益和电流检测电阻的值决定了适合 dsPIC® DSC 内部数字表示的最大电流值。反之，内部数字表示处于上限的电流也表示峰值电流，因为可能会将其输入到指示的 Excel 电子表格字段中。

图 1-2: 信号调理电路



对于上面图 1-2 中显示的电路，电流采集电路的放大增益为：

$$G = \frac{R20}{R22 + R23} = 75$$

MCLV 的电流检测电阻值为 5 mΩ，利用 ADC 输入可承受的最大电压 3.3V，可以得出最大电流读数：

$$I_{max} = \frac{V_{REF}}{\text{电流检测电阻值} \cdot \text{增益}} = \frac{\frac{3.3}{2}}{0.005 \cdot 75} = 4.4A$$

请注意，计算出的峰值电流 ( $I_{max}$ ) 与 Excel 电子表格文件 (图 1-1) 中指示的峰值电流不同，这是因为第二个值是通过实验确定的，本文档后面的部分将对其进行介绍 (第 3-d 步)。

## c) PWM 周期和死区

*PWM Period* 是此算法 (AN1292) 的采样和控制周期。*死区*表示功率半导体器件从上一状态中恢复所需的时间，以防在任何逆变器桥臂上出现直通。在这些字段中输入的值应与使用的值一致。

本应用笔记中包含的演示软件使用 2 μs 的死区，而使用的 PWM 周期为 50 μs，即 PWM 频率为 20 kHz。

## d) 电机的电气参数

对于参数 *Stator resistance (Rs)*、*Stator inductance (Ls)* 和 *Voltage constant (Kfi)*，请输入电机制造商提供的信息，也可以通过实验方式确定。

有关通过实验方式计算 *Kfi* 的详细信息，请参见应用笔记 AN1292 的“调整和实验结果”一节。

## e) 标称速度和最大速度

*Nominal speed* 是制造商提供的参数，它表示在电机标牌上标示的标称电流和电压下可达到的速度。

*Maximum speed* 也是制造商提供的参数，它主要取决于电机的机械参数。可以发现，最大速度大于标称速度，并且两个值之间的区域处于恒定功率模式，这表示应用了弱磁技术。

## f) 预除法因数

*Predivision* 列对应于一个缩放常数，该缩放常数用于将计算出的归一化值转换到数值表示范围 [-32768, 32767] 中。预除法缩放不仅应将常数转换至该范围，对于电压常数（Kfi）倒数，也应该对其最初计算出的值进行除法运算，以便之后由于弱磁技术而增加时，该值不会溢出数值表示范围。

在软件代码中可以找到除法运算项（左移）形式的预除法因数。

例如，NORM\_LSDTBASE 预除法缩放因子在电子表格中为 256，这会体现为以下代码行：

```
estim.c
118      EstimParam.qVIndbeta = ((long)MotorEstimParam.qLsDt * (EstimParam.qDIbeta))>>7;
```

可以发现，由于之前的预除法因数为  $2^8$ ，最终右移 7 位，而不是 15 位。

NORM\_RS 的情况与之相同，它预除以 2，以便使 NORM\_RS 保持在范围内，防止数值溢出。这会使 estim.c 的相应代码部分移位 14 位而不是 15 位以抵消最初的预除法因数：

```
estim.c
133      EstimParam.qEsa      =      EstimParam.qLastValpha -
134      (((long) MotorEstimParam.qRs * (long) ParkParam.qIalpha) >>14)
135      -EstimParam.qVIndalpha;
```

对于 NORM\_INVKFIBASE，预除数是 2，并在以下代码行中进行乘法来抵消预除法因数：

```
estim.c
209      EstimParam.qOmegaMr=EstimParam.qOmegaMr<<1;
```

---

## 第 2 步 —— 将生成的参数导出到 userparams.h

右侧列中分组为输出参数的生成值将被输入到 userparams.h 文件中的相应定义。

请注意，*Output parameters* 中的各项具有不同的颜色，这精确地表示出应将哪些项直接复制并粘贴到软件代码中。

userparams.h

```
139 #define NORM_CURRENT_CONST      0.000153
140 /* normalized ls/dt value */
141 #define NORM LSDTBASE 1848
142 /* normalized rs value */
143 #define NORM_RS 16433
144 /* the calculation of Rs gives a value exceeding the Q15 range so,
145 the normalized value is further divided by 2 to fit the 32768 limit */
146 /* this is taken care in the estim.c where the value is implied */
147 /* normalized inv kfi at base speed */
148 #define NORM_INVKFIBASE 7956
149 /* the calculation of InvKfi gives a value which not exceed the Q15 limit */
150 /* to assure that an increase of the term with 5 is possible in the lookup table
151 /* for high flux weakening the normalized is initially divided by 2 */
152 /* this is taken care in the estim.c where the value is implied */
153 /* normalized dt value */
154 #define NORM_DELTAT 1790
155
156 // Limitation constants
157 /* di = i(t1)-i(t2) limitation */
158 /* high speed limitation, for dt 50us */
159 /* the value can be taken from attached xls file */
160 #define D_ILIMIT_HS 1502
161 /* low speed limitation, for dt 8*50us */
162 #define D_ILIMIT_LS 6117
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173 /* Nominal speed of the motor in RPM */
174 #define NOMINAL_SPEED_RPM      2800 // Value in RPM
175 /* Maximum speed of the motor in RPM - given by the motor's manufacturer */
176 #define MAXIMUM_SPEED_RPM      5500 // Value in RPM
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
```

## 第 3 步 —— 首先，调整开环

## a) 使开环工作

在 FOC 软件代码中启用一个特殊的 `#define` 可以单独运行开环调整；否则将自动进行到闭环控制的过渡。确保禁止闭环过渡以进行最初的开环调整。

userparms.h

```
57 /* open loop continuous functioning */
58 /* closed loop transition disabled */
59 #define OPEN_LOOP_FUNCTIONING
```

## b) 设置开环参数

## • 电流缩放

需要设置预缩放常数，以将 ADC 输出调整至对应于带符号（方向）的实际值，并且必要时将其预缩放为足够进一步处理的中间值。

userparms.h

```
122 #define KCURRA Q15(-0.5) /* scaling factor for current phase A */
123 #define KCURRB Q15(-0.5) /* scaling factor for current phase B */
```

电流的缩放因子为负，因为电流检测电阻上的采集操作获得的是反向电流，因此值 `Q15(-0.5)` 表示 ADC 返回的 `Q15` 值乘以 `(-1)`。

## • 启动转矩电流

选择给定电机的标称电流作为起点，如下所示（本例中，使用 `1.41 A` 的电流值）：

userparms.h

```
197 /* open loop q current setup - */
198 #define Q_CURRENT_REF_OPENLOOP NORM_CURRENT(1.41)
199
```

如果启动电流过低，负载不会移动。如果启动电流过高，电机长时间运行在开环状态下可能会过热。

## • 锁定时间

通常，选择几百毫秒的锁定时间值。

userparms.h

```
188 /* open loop startup constants */
189 /* the following values depends on the PWM frequency, */
190 /* lock time is the time needed for motor's poles alignment
191 before the open loop speed ramp up */
192 #define LOCK_TIME 4000 // This number is: 20,000 is 1 second.
```

锁定时间值取决于 PWM 频率。例如，频率为 `20 kHz` 时，值 `4000` 表示 `0.2 秒`。

## • 斜线上升率

在开始时应将开环加速度设置得尽可能小。此值越小，电机越能以更高的阻转力矩或转动惯量启动。

userparms.h

```
195 /* open loop speed ramp up speed of increase */
196 #define OPENLOOP_RAMPSPEED_INCREASERATE 10
```

- 最终转速

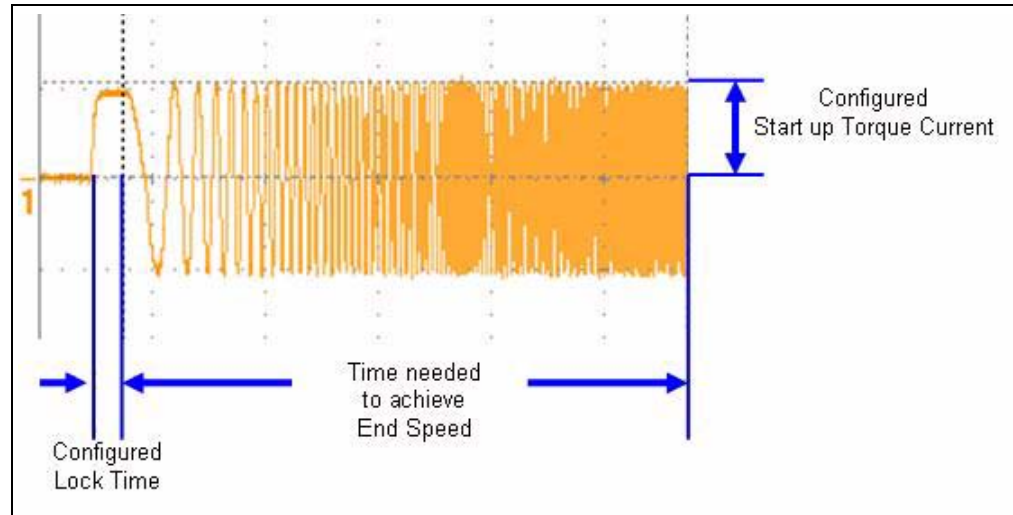
设置最终转速值时需要在控制效率和估算器的最小速度限制（用于精确估算速度和位置）之间进行权衡。通常，用户希望将开环最终转速值设置得尽可能小，以便启动之后尽快过渡到闭环。记住上面所述的折衷原则，考虑一开始将最终转速设置为要进行调整的电机的标称速度的三分之一。

userparms.h

```
193 /* open loop speed ramp up end value */  
194 #define END_SPEED_RPM 1000 // Value in RPM
```

图 1-3 展示了先前选择的参数。该图表示将示波器电流探头连接到一个电机相时的截图。

图 1-3:





- *PI 电流控制器*

用于有效调整此应用的 PI 控制器的一些常规准则包括：

- D 轴和 Q 轴上的两个控制器对于相应的比例 (D\_CURRCNTR\_PTERM 和 Q\_CURRCNTR\_PTERM)、积分 (D\_CURRCNTR\_ITERM 和 Q\_CURRCNTR\_ITERM)、抗积分饱和 (D\_CURRCNTR\_CTERM 和 Q\_CURRCNTR\_ITERM) 以及最小值 - 最大值 (D\_CURRCNTR\_OUTMAX、Q\_CURRCNTR\_OUTMAX、D\_CURRCNTR\_OUTMIN 和 Q\_CURRCNTR\_OUTMIN) 等参数具有相同的值。
- 通常，只要出现电流振荡，降低比例增益项就可确保积分增益与比例增益相比小 5 到 10 倍。

使用下面显示的值作为起点。

userparms.h

```

204  /* PI controllers tuning values - */
205  //***** D Control Loop Coefficients *****
206  #define D_CURRCNTR_PTERM Q15(0.05)
207  #define D_CURRCNTR_ITERM Q15(0.005)
208  #define D_CURRCNTR_CTERM Q15(0.999)
209  #define D_CURRCNTR_OUTMAX 0x7FFF

211  //***** Q Control Loop Coefficients *****
212  #define Q_CURRCNTR_PTERM Q15(0.05)
213  #define Q_CURRCNTR_ITERM Q15(0.005)
214  #define Q_CURRCNTR_CTERM Q15(0.999)
215  #define Q_CURRCNTR_OUTMAX 0x7FFF

```

c) 开环参数优化

上面的设置将使开环运行。如果已验证使用上面介绍的设置时一切工作正常，可尝试通过以下方式微调参数，使运行更加平稳高效：

- 减小启动转矩电流
- 增大加速斜率
- 缩短锁定时间
- 减小最终转速

---

## 第 4 步 —— 调整闭环运行

### a) 启用闭环过渡

开环运行正常后，通过移除 OPEN\_LOOP\_FUNCTIONING 宏定义转到闭环调整。

userparams.h

```
57 /* open loop continuous functioning */
58 /* closed loop transition disabled */
59 #undef OPEN_LOOP_FUNCTIONING
60
```

### b) 设置闭环参数

#### • 初始角度偏移调整

开环到闭环之间的过渡意味着存在初始估算误差，需要针对此误差预先选择一个初始偏移角度：

userparams.h

```
183 #define INITOFFSET_TRANS_OPEN_CLSD 0x2000
```

初始值 0x2000 对应于 45 度的偏移角。用于获取对应于特定偏移角的值的公式为

$$value = 0xFFFF \cdot \frac{angle^{\circ}}{360^{\circ}}$$

根据负载的阻转矩、转动惯量，或根据电机的电气常数，修改角度以消除最终的开环 / 闭环过渡问题。

#### • 估算器滤波系数

为滤波系数设置的默认常数对于大多数电机来说都应获得良好的结果。但是，减小系数将减小相位延迟，相位延迟在电枢电流变化较快的高速情况下特别有用。应在滤波作用与其副效应（引入相移）之间取得平衡。

userparams.h

```
167 // Filters constants definitions
168 /* BEMF filter for d-q components @ low speeds */
169 #define KFILTER_ESDQ 1200
170 /* BEMF filter for d-q components @ high speed - Flux Weakening case */
171 #define KFILTER_ESDQ_FW 164
172 /* estimated speed filter constan */
173 #define KFILTER_VELESTIM 2*374
```

#### • PI 速度控制器

对于速度控制器调整，可以使用多种方法对 P 和 I 增益进行调整。有关详细信息，请在维基百科网站上搜索“PID Controller”，然后转到“Loop Tuning”部分。

userparams.h

```
217 /*** Velocity Control Loop Coefficients ****
218 #define SPEEDCNR_PTERM Q15(0.5)
219 #define SPEEDCNR_ITERM Q15(0.005)
220 #define SPEEDCNR_CTERM Q15(0.005)
221 #define SPEEDCNR_OUTMAX 0x5000
```

如果不需要速度控制器，可以通过定义 TORQUE\_MODE 来激活转矩模式。

userparams.h

```
62 /* definition for torque mode - for a separate tuning of the current PI
63 controllers, tuning mode will disable the speed PI controller */
64 #define TORQUE_MODE
```



第 5 步 —— 调整高速弱磁参数（可选）

警告

通常，电机制造商会指示电机在不受损的情况下可达到的最大速度（可能比额定电流下的制动点速度大）。如果未指示，则能以更高的速度运行，但只能持续短暂时间（间歇），以避免电机或连接到电机的设备发生消磁或机械损坏的风险。

在弱磁模式下，如果由于在高于标称值的高速下角度计算出错而导致控制器故障，则逆变器可能很快就会损坏。原因是反电动势（Back Electromotive Force, BEMF）的值将高于在标称速度下获得的值，因而会超出逆变器的功率半导体器件和直流链路电容所必须支持的直流总线电压值。由于建议的调整意味着在达到最佳运行状态前进行迭代系数校正，应将具有相应电路的逆变器的保护修改为在高速停转时能应对更高的电压。

a) 设置初始参数

- 标称速度和最大速度

以标称速度值的 RPM 开始（即，比电机额定速度小几百 RPM）。在本例中，电机额定速度为 3000 RPM；因此，我们将 NOMINAL\_SPEED\_RPM 设置为 2800。请查询电机规范以了解最大弱磁速度，并将该值输入到 MAXIMUM\_SPEED\_RPM 中。

userparms.h

```
133  /* Nominal speed of the motor in RPM */
134  #define NOMINAL_SPEED_RPM    2800 // Value in RPM
135  /* Maximum speed of the motor in RPM - given by the motor's manufacturer */
136  #define MAXIMUM_SPEED_RPM    5500 // Value in RPM
```

请注意，对于这些大于（超过）标称速度的值将启用弱磁策略，因此，降低用于平滑此过渡的标称速度意味着在降低气隙磁通时会消耗其它能量，这会导致总体效率降低。

- *D 轴基准电流*

D 轴基准电流查找表（ID）中的值在 0 到标称定子电流值之间，并均匀分布在查找表的 18 个条目中。标称定子电流可从电机规范中获取。如果该值未知，可通过用额定功率除以额定电压近似得出。

userparms.h

```

254  /* the following values indicate the d-current variation with speed */
255  /* please consult app note for details on tuning */
256  #define IDREF_SPEED0    NORM_CURRENT(0)        // up to 2800 RPM
257  #define IDREF_SPEED1    NORM_CURRENT(-0.24)    // ~2950 RPM
258  #define IDREF_SPEED2    NORM_CURRENT(-0.56)    // ~3110 RPM
259  #define IDREF_SPEED3    NORM_CURRENT(-0.828)   // ~3270 RPM
260  #define IDREF_SPEED4    NORM_CURRENT(-1.121)   // ~3430 RPM
261  #define IDREF_SPEED5    NORM_CURRENT(-1.385)   // ~3600 RPM
262  #define IDREF_SPEED6    NORM_CURRENT(-1.6)     // ~3750 RPM
263  #define IDREF_SPEED7    NORM_CURRENT(-1.8)     // ~3910 RPM
264  #define IDREF_SPEED8    NORM_CURRENT(-1.923)   // ~4070 RPM
265  #define IDREF_SPEED9    NORM_CURRENT(-2.055)   // ~4230 RPM
266  #define IDREF_SPEED10   NORM_CURRENT(-2.15)    // ~4380 RPM
267  #define IDREF_SPEED11   NORM_CURRENT(-2.2)     // ~4550 RPM
268  #define IDREF_SPEED12   NORM_CURRENT(-2.25)    // ~4700 RPM
269  #define IDREF_SPEED13   NORM_CURRENT(-2.3)     // ~4860 RPM
270  #define IDREF_SPEED14   NORM_CURRENT(-2.35)    // ~5020 RPM
271  #define IDREF_SPEED15   NORM_CURRENT(-2.4)     // ~5180 RPM
272  #define IDREF_SPEED16   NORM_CURRENT(-2.423)   // ~5340 RPM
273  #define IDREF_SPEED17   NORM_CURRENT(-2.442)   // ~5500 RPM
274

```

- *电压常数倒数*

在查找表中，与弱磁模式下可达到的最大速度所对应的条目与机械速度从标称值到最大值的生长百分比成正比。在查找表条目中，各个值均匀分布，如果对应于最大速度的电压常数倒数超出数值表示范围（32,767），则调整相应的预除法缩放因子。请注意，以下数字预先除以 2（见图 1-1）。

userparms.h

```

276  /* the following values indicate the invKfi variation with speed */
277  /* please consult app note for details on tuning */
278  #define INVKFI_SPEED0    7956        // up to 2800 RPM
279  #define INVKFI_SPEED1    9300        // ~2950 RPM
280  #define INVKFI_SPEED2    10820       // ~3110 RPM
281  #define INVKFI_SPEED3    11900       // ~3270 RPM
282  #define INVKFI_SPEED4    13110       // ~3430 RPM
283  #define INVKFI_SPEED5    14000       // ~3600 RPM
284  #define INVKFI_SPEED6    14800       // ~3750 RPM
285  #define INVKFI_SPEED7    15350       // ~3910 RPM
286  #define INVKFI_SPEED8    15720       // ~4070 RPM
287  #define INVKFI_SPEED9    16120       // ~4230 RPM
288  #define INVKFI_SPEED10   16520       // ~4380 RPM
289  #define INVKFI_SPEED11   16740       // ~4550 RPM
290  #define INVKFI_SPEED12   16920       // ~4700 RPM
291  #define INVKFI_SPEED13   17140       // ~4860 RPM
292  #define INVKFI_SPEED14   17430       // ~5020 RPM
293  #define INVKFI_SPEED15   17650       // ~5180 RPM
294  #define INVKFI_SPEED16   17840       // ~5340 RPM
295  #define INVKFI_SPEED17   17950       // ~5500 RPM

```

- 电感变化

对于电感变化（LsOver2Ls0）查找表，表中的第一个值应始终为 1/2，因为基本速度电感会除以其自身二倍的值。这些值应适用于大多数电机。

userparms.h

```

297  /* the following values indicate the Ls variation with speed */
298  /* please consult app note for details on tuning */
299  #define      LS_OVER2LS0_SPEED0      Q15(0.5)    // up to 2800 RPM
300  #define      LS_OVER2LS0_SPEED1      Q15(0.45)   // ~2950 RPM
301  #define      LS_OVER2LS0_SPEED2      Q15(0.4)    // ~3110 RPM
302  #define      LS_OVER2LS0_SPEED3      Q15(0.35)   // ~3270 RPM
303  #define      LS_OVER2LS0_SPEED4      Q15(0.3)    // ~3430 RPM
304  #define      LS_OVER2LS0_SPEED5      Q15(0.25)   // ~3600 RPM
305  #define      LS_OVER2LS0_SPEED6      Q15(0.25)   // ~3750 RPM
306  #define      LS_OVER2LS0_SPEED7      Q15(0.25)   // ~3910 RPM
307  #define      LS_OVER2LS0_SPEED8      Q15(0.25)   // ~4070 RPM
308  #define      LS_OVER2LS0_SPEED9      Q15(0.25)   // ~4230 RPM
309  #define      LS_OVER2LS0_SPEED10     Q15(0.25)   // ~4380 RPM
310  #define      LS_OVER2LS0_SPEED11     Q15(0.25)   // ~4550 RPM
311  #define      LS_OVER2LS0_SPEED12     Q15(0.25)   // ~4700 RPM
312  #define      LS_OVER2LS0_SPEED13     Q15(0.25)   // ~4860 RPM
313  #define      LS_OVER2LS0_SPEED14     Q15(0.25)   // ~5020 RPM
314  #define      LS_OVER2LS0_SPEED15     Q15(0.25)   // ~5180 RPM
315  #define      LS_OVER2LS0_SPEED16     Q15(0.25)   // ~5340 RPM
316  #define      LS_OVER2LS0_SPEED17     Q15(0.25)   // ~5500 RPM

```

#### b) 运行时参数调整

如果在上述条件下运行软件的结果是电机以大于标称值的速度停转，则原因是查找表中填入的估算值在某一时刻与实际的非线性值不匹配。

电机一旦停转，将立即使程序停止执行，以捕获调试器观察窗口中索引（FdWeakParm.qIndex）的值。该索引以升序方式指示 IDREF 的值（见第 5a 步中的 IDREF 表）未起作用且应更新的时刻。为了进一步提高性能，应将查找表中当前索引指示的值替换为下一索引（FdWeakParm.qIndex + 1）指示的值，并应再次检查电机的行为。达到的速度应增加，如果多次重复此过程，将达到 d 轴上施加的标称基准电流对应的最大速度。

如果在标称电流下获得的最大速度小于目标值，则应将 d 轴基准电流的绝对值增加到大于标称值。例如，如果无法达到 5500 RPM，则将 IDREF\_SPEED17 电流从 -1.53 更改为 -1.60，然后再试一次。应该从电机停转处的索引所指示的值开始增加 d 轴基准电流。索引值应该对应于在电机轴上使用转速计测量的电机实际速度，请记住，应使用基准速度而不是实际速度来计算查找表索引。

一旦增大 d 轴电流的操作不再使速度增加（电流增加过多通常将使电机停转），与停转对应的索引将指示应如何调整（增大或减小）电感值。电感变化查找表是要更新的最后一项。

---

---

使用软件速度基准始终要比标准电位计 /DMCI 滑动条控件更为准确，因为它更稳定并且可以提供更理想的粒度。

为了进行测试，我们实现了一个较慢的软件斜坡作为速度基准，并使用以下定义将其激活：

userparms.h

```
107 #define TUNING_DELAY_RAMPUP 0x3F /* the smaller the value, the smaller the
```

斜坡延迟的值越小，斜坡增加得越缓慢。此斜坡始终从开环零速度开始，在开环下达到 END\_SPEED\_RPM 值，然后转到闭环，并在闭环下继续加速到 MAXIMUM\_SPEED\_RPM。软件速度基准对于此算法的弱磁区域特别重要，因为它用于确定查找表中的索引。

---

---

请注意以下有关 Microchip 器件代码保护功能的要点:

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术指标。
- Microchip 确信: 在正常使用的情况下, Microchip 系列产品是当今市场上同类产品中最安全的产品之一。
- 目前, 仍存在着恶意、甚至是非法破坏代码保护功能的行为。就我们所知, 所有这些行为都不是以 Microchip 数据手册中规定的操作规范来使用 Microchip 产品的。这样做的人极可能侵犯了知识产权。
- Microchip 愿与那些注重代码完整性的客户合作。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。

代码保护功能处于持续发展。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。任何试图破坏 Microchip 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字器件千年版权法案 (Digital Millennium Copyright Act)》。如果这种行为导致他人在未经授权的情况下, 能访问您的软件或其他受版权保护的成果, 您有权依据该法案提起诉讼, 从而制止这种行为。

---

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分, 因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物中所述的器件应用信息及其他类似内容仅为您提供便利, 它们可能由更新之信息所替代。确保应用符合技术规范, 是您自身应负的责任。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保, 包括但不限于针对其使用情况、质量、性能、适销性或特定用途的适用性的声明或担保。Microchip 对因这些信息及使用这些信息而引起的后果不承担任何责任。如果将 Microchip 器件用于生命维持和/或生命安全应用, 一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切伤害、索赔、诉讼或费用时, 会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任, 并加以赔偿。在 Microchip 知识产权保护下, 不得暗中以其他方式转让任何许可证。

#### 商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、dsPIC、KEELOQ、KEELOQ 徽标、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、PIC<sup>32</sup> 徽标、rPIC 和 UNI/O 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的注册商标。

FilterLab、Hampshire、HI-TECH C、Linear Active Thermistor、MXDEV、MXLAB、SEEVAL 和 The Embedded Control Solutions Company 均为 Microchip Technology Inc. 在美国的注册商标。

Analog-for-the-Digital Age、Application Maestro、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、dsPICworks、dsSPEAK、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、HI-TIDE、In-Circuit Serial Programming、ICSP、Mindi、MiWi、MPASM、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、mTouch、Omniscient Code Generation、PICC、PICC-18、PICDEM、PICDEM.net、PICKit、PICKtail、REAL ICE、rLAB、Select Mode、Total Endurance、TSHARC、UniWinDriver、WiperLock 和 ZENA 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 是 Microchip Technology Inc. 在美国的服务标记。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2010, Microchip Technology Inc. 版权所有。

ISBN: 978-1-60932-746-0

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM  
CERTIFIED BY DNV  
== ISO/TS 16949:2002 ==

Microchip 位于美国亚利桑那州 Chandler 和 Tempe 与位于俄勒冈州 Gresham 的全球总部、设计和晶圆生产厂及位于美国加利福尼亚州和印度的设计中心均通过了 ISO/TS-16949:2002 认证。公司在 PIC<sup>®</sup> MCU 与 dsPIC<sup>®</sup> DSC、KEELOQ<sup>®</sup> 跳码器件、串行 EEPROM、单片机外设、非易失性存储器 and 模拟产品方面的质量体系流程均符合 ISO/TS-16949:2002。此外, Microchip 在开发系统的设计和生产方面的质量体系也已通过了 ISO 9001:2000 认证。

## 全球销售及服务中心

### 美洲

公司总部 **Corporate Office**  
2355 West Chandler Blvd.  
Chandler, AZ 85224-6199  
Tel: 1-480-792-7200  
Fax: 1-480-792-7277

技术支持:  
<http://support.microchip.com>  
网址: [www.microchip.com](http://www.microchip.com)

#### 亚特兰大 Atlanta

Duluth, GA  
Tel: 1-678-957-9614  
Fax: 1-678-957-1455

#### 波士顿 Boston

Westborough, MA  
Tel: 1-774-760-0087  
Fax: 1-774-760-0088

#### 芝加哥 Chicago

Itasca, IL  
Tel: 1-630-285-0071  
Fax: 1-630-285-0075

#### 克里夫兰 Cleveland

Independence, OH  
Tel: 1-216-447-0464  
Fax: 1-216-447-0643

#### 达拉斯 Dallas

Addison, TX  
Tel: 1-972-818-7423  
Fax: 1-972-818-2924

#### 底特律 Detroit

Farmington Hills, MI  
Tel: 1-248-538-2250  
Fax: 1-248-538-2260

#### 科科莫 Kokomo

Kokomo, IN  
Tel: 1-765-864-8360  
Fax: 1-765-864-8387

#### 洛杉矶 Los Angeles

Mission Viejo, CA  
Tel: 1-949-462-9523  
Fax: 1-949-462-9608

#### 圣克拉拉 Santa Clara

Santa Clara, CA  
Tel: 1-408-961-6444  
Fax: 1-408-961-6445

#### 加拿大多伦多 Toronto

Mississauga, Ontario, Canada  
Tel: 1-905-673-0699  
Fax: 1-905-673-6509

### 亚太地区

#### 亚太总部 Asia Pacific Office

Suites 3707-14, 37th Floor  
Tower 6, The Gateway  
Harbour City, Kowloon  
Hong Kong  
Tel: 852-2401-1200  
Fax: 852-2401-3431

#### 中国 - 北京

Tel: 86-10-8528-2100  
Fax: 86-10-8528-2104

#### 中国 - 成都

Tel: 86-28-8665-5511  
Fax: 86-28-8665-7889

#### 中国 - 重庆

Tel: 86-23-8980-9588  
Fax: 86-23-8980-9500

#### 中国 - 香港特别行政区

Tel: 852-2401-1200  
Fax: 852-2401-3431

#### 中国 - 南京

Tel: 86-25-8473-2460  
Fax: 86-25-8473-2470

#### 中国 - 青岛

Tel: 86-532-8502-7355  
Fax: 86-532-8502-7205

#### 中国 - 上海

Tel: 86-21-5407-5533  
Fax: 86-21-5407-5066

#### 中国 - 沈阳

Tel: 86-24-2334-2829  
Fax: 86-24-2334-2393

#### 中国 - 深圳

Tel: 86-755-8203-2660  
Fax: 86-755-8203-1760

#### 中国 - 武汉

Tel: 86-27-5980-5300  
Fax: 86-27-5980-5118

#### 中国 - 西安

Tel: 86-29-8833-7252  
Fax: 86-29-8833-7256

#### 中国 - 厦门

Tel: 86-592-238-8138  
Fax: 86-592-238-8130

#### 中国 - 珠海

Tel: 86-756-321-0040  
Fax: 86-756-321-0049

#### 台湾地区 - 高雄

Tel: 886-7-213-7830  
Fax: 886-7-330-9305

#### 台湾地区 - 台北

Tel: 886-2-2500-6610  
Fax: 886-2-2508-0102

### 亚太地区

#### 台湾地区 - 新竹

Tel: 886-3-6578-300  
Fax: 886-3-6578-370

#### 澳大利亚 Australia - Sydney

Tel: 61-2-9868-6733  
Fax: 61-2-9868-6755

#### 印度 India - Bangalore

Tel: 91-80-3090-4444  
Fax: 91-80-3090-4123

#### 印度 India - New Delhi

Tel: 91-11-4160-8631  
Fax: 91-11-4160-8632

#### 印度 India - Pune

Tel: 91-20-2566-1512  
Fax: 91-20-2566-1513

#### 日本 Japan - Yokohama

Tel: 81-45-471-6166  
Fax: 81-45-471-6122

#### 韩国 Korea - Daegu

Tel: 82-53-744-4301  
Fax: 82-53-744-4302

#### 韩国 Korea - Seoul

Tel: 82-2-554-7200  
Fax: 82-2-558-5932 或  
82-2-558-5934

#### 马来西亚 Malaysia - Kuala Lumpur

Tel: 60-3-6201-9857  
Fax: 60-3-6201-9859

#### 马来西亚 Malaysia - Penang

Tel: 60-4-227-8870  
Fax: 60-4-227-4068

#### 菲律宾 Philippines - Manila

Tel: 63-2-634-9065  
Fax: 63-2-634-9069

#### 新加坡 Singapore

Tel: 65-6334-8870  
Fax: 65-6334-8850

#### 泰国 Thailand - Bangkok

Tel: 66-2-694-1351  
Fax: 66-2-694-1350

### 欧洲

#### 奥地利 Austria - Wels

Tel: 43-7242-2244-39  
Fax: 43-7242-2244-393

#### 丹麦 Denmark - Copenhagen

Tel: 45-4450-2828  
Fax: 45-4485-2829

#### 法国 France - Paris

Tel: 33-1-69-53-63-20  
Fax: 33-1-69-30-90-79

#### 德国 Germany - Munich

Tel: 49-89-627-144-0  
Fax: 49-89-627-144-44

#### 意大利 Italy - Milan

Tel: 39-0331-742611  
Fax: 39-0331-466781

#### 荷兰 Netherlands - Druenen

Tel: 31-416-690399  
Fax: 31-416-690340

#### 西班牙 Spain - Madrid

Tel: 34-91-708-08-90  
Fax: 34-91-708-08-91

#### 英国 UK - Wokingham

Tel: 44-118-921-5869  
Fax: 44-118-921-5820