# 1:概要

事业的发展，和登山一样，流畅的阵地，摇篮期开始急剧斜率增长 经过成长期的山顶，到达成熟期。超过山顶不久进入下行走向衰退。事业的支撑技术, 负责此技术人员数量来看同样是山形。摇篮期是一个人或几个技术人员的技术掌握能够决定一切，在成长期现模扩大，一起从事的人也多。技术的范围也扩大为一个人覆盖的范围缩小,而大量的人分担一些事情。因此技术专业化、细分化,能掌握整个系统的人比较少。

摇篮期到成长期的初期这段时间由技术人员支持，接近成熟期的时候从技术的第一线退下来的普通员工作为管理人员。

这样状况的陷入史无前例并无法摆脱，科研开发和解决产品问题能力的低下，部分或者不适合全局的人员滞留阻碍事业的发展。伺服事业这个阶段本着事业做大的目的要消除这些障碍。负责技术领域超过了整个伺服技术,理解其中的专业技术和设计需要培养更多的技术人员。

这个手册有助于消除障碍,期待编写。

该手册是讲述一个伺服产品的问题的内容和使用方法。讲述对象是初级技人员，伺服放大器的设计技术,从设计手册和设计解说的两面开始记述。开发设计人员,应用设计人员和质量管理工程师，服务工程师等也包括在内。设计的理论为第二章,第三章,推荐阅读。4章以后的详细设计,所以出现产品的解说用词也会随意。索引不仅仅是基本放大器的设计，其他产品在内的设计共同的观点探索也涉及。另外,失败案例也可以索引。

马达和伺服产品中伺服放大器是如何分担功能要求与性能实现是整体设计最初值得探讨的东西,但这些是公司的长年的经验已经成为产品，已经形成体系,这里以现有的产品体系沿着伺服放大器的设计为主体进行解说。当市场的要求规格也发生了很大的变化的时候，现有的产品体系中,某个特定问题的解决不起作用的时候,这个原点追溯到开始设计是有必要的。

该手册是最新机型的Σ-Ⅲ类型B伺服,以SGDS-02A具体设计内容为解说。Σ-Ⅲ伺服的电源和容量根据不同电路构成。但是,设计内容部分有很多共同点,所以其他机型也可以参考设计。不断对该手册的内容进行补充，并继续提高水平。

# 2：AC伺服马达控制的概要

## 2.1 AC伺服马达

在这一章里 ，概要讲解AC伺服马达及其控制问题，后面章节详细说明。

伺服马达以控制位置作为主要用途使用，做要求规格的动作和速度的快慢光滑，容易控制。为了满足这个要求，

1：发生扭矩/惯量:T / J相比，

2：功率/惯量(K w / J),

3：机械时间常数(s):(绕线电阻)×(惯量)/(扭矩常数)/(电压常数)

4：阶跃的外加电压时到达马达速度最后值63 . 2 %的时间

5：马达容量的标准（马达常数(N / M /√W)）等为代表的数值的性能作为标准被重视。

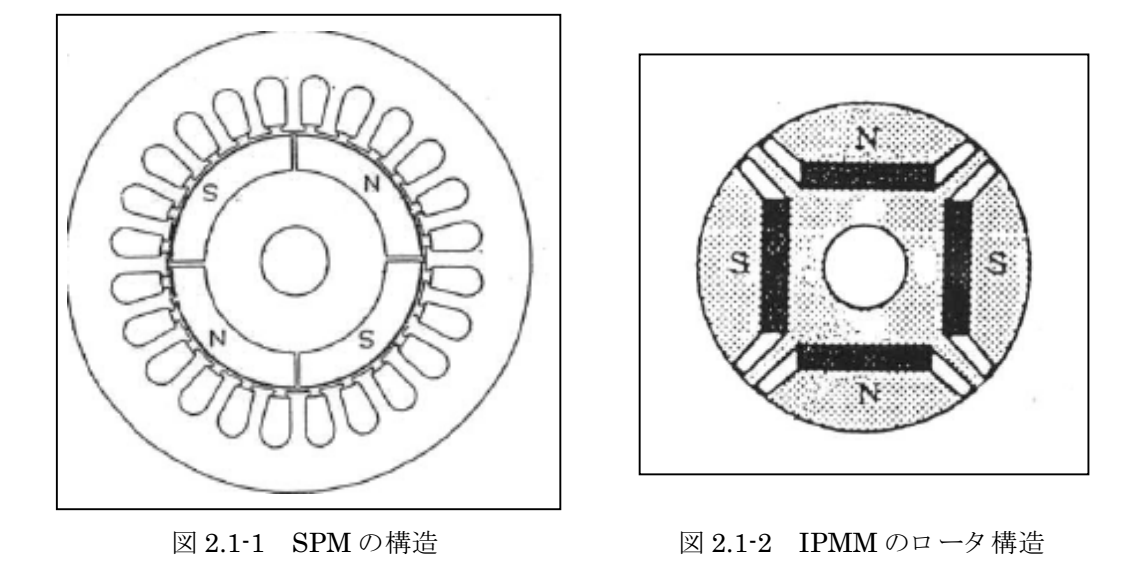
前面提到的指标，如果想提高，结构上采用小惯量，采用电感小,采用电气时间常数小的设计。

曾代表公司风靡一时的DC伺服马达的系列。机械时间常数以ms为自豪的机型已经商品化。

但是,半导体的进步和社会的需要，开始从DC马达到AC马达的转换，在1970年代后期开始。DC马达靠电刷换向与马达内部各线圈对应。

DC马达扭矩的方向发生依次自动前进。但是,AC马达,马达位置的判别。根据位置控制线圈中的电流产生一定方向的扭矩,否则电流成比例的脉动扭矩是要发生的。

AC马达一般分为变贴式和内嵌式



AC伺服马达特性与DC马达一样，结构上是小惯量，扭矩常数和电压常数较大,绕线电抗小被要求。

AC伺服马达产生的扭矩是根据左手法则，与电流和磁场成正比。

对伺服马达来说有额定扭矩和最大扭矩。

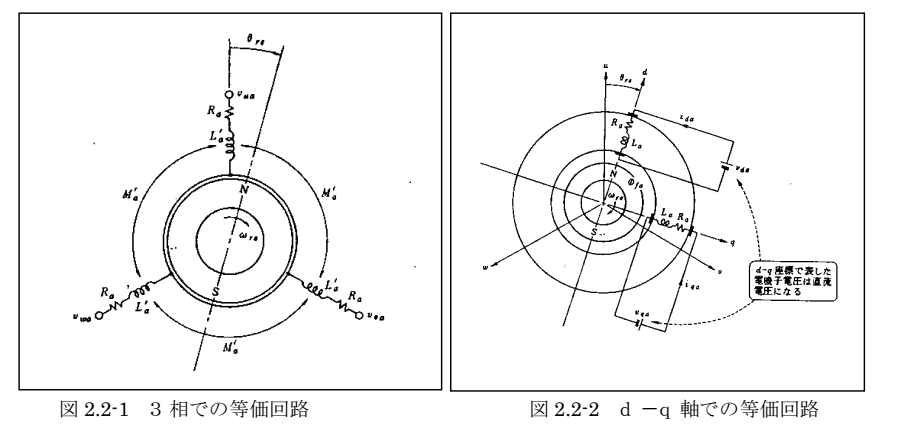
额定扭矩是可以令人连续使用的最大扭矩。最大扭矩是可以暂时发生瞬间最大扭矩。额定扭矩的大小需要考虑马达构造和冷却能力等条件。最大扭矩: 放大器和马达的各要素来决定，其中放大器的最大电流影响更大。马达的制约在于绕线电流产生的电机的减磁反作用。减磁问题特别是在马达在高温状态下和是否正在减磁需要考虑。

## 2.2：伺服马达扭矩发生

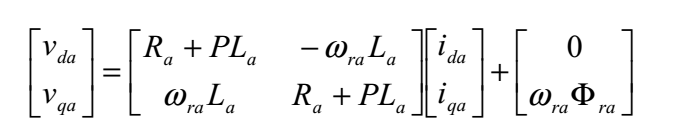
扭矩的产生是前面说的一样。磁场中有电流流动而产生的扭矩和电动机内部的电磁场能量发生变化

SPM主要是利用前者产生扭矩。IPM是由前者产生一部分的扭矩和利用后者的凸极效应产生扭矩。

伺服马达转矩和转子的位置，气隙中的能量状态的变化而发生的。



等效电压方程



上式转矩的发生没有凸极性作用。

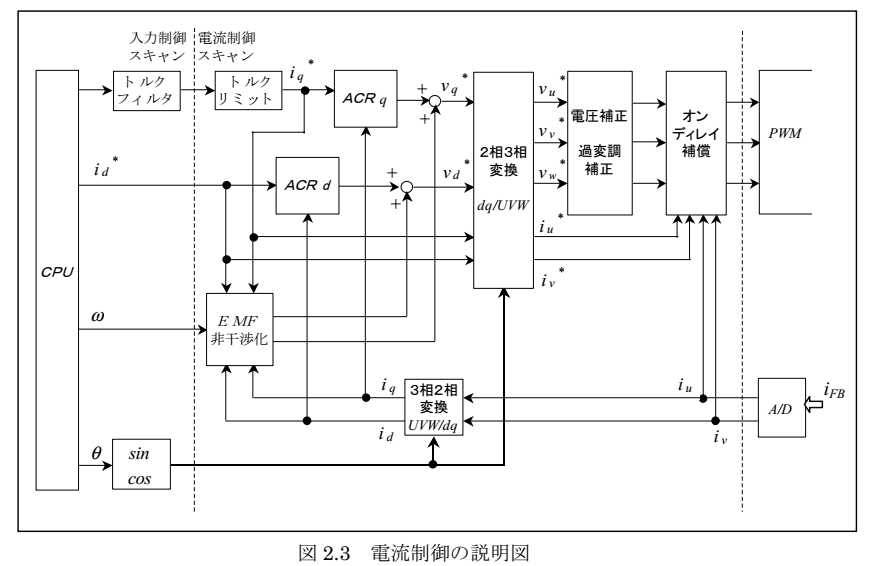


## 2.3：电流控制

伺服马达的扭矩产生的几乎由电流决定。要使马达的速度控制精度好，扭矩控制是必要的。在这个意义上,电流控制是全体特性发展的重要控制。另外，除去一部分马达，在控制电流环上没有不稳定的。最近的 Σ马达为代表的马达使其空间因素尽可能增大，绕线尽可能使得电气时间常数(L / R)比较大，10ms左右。马达机械时间常数随着磁铁的性能提高和惯量的减小而逐年变小，最近在2 ~ 3 ms左右的值，这一趋势一直持续。机械时间常数比电气时间常数小使得外侧的控制环路快了，控制向着不稳定的方向发展。为了纠正这一问题需要对电流进行控制，等价的电气时间常数有必要尽快，因此电流控制环路是必不可少的因素。

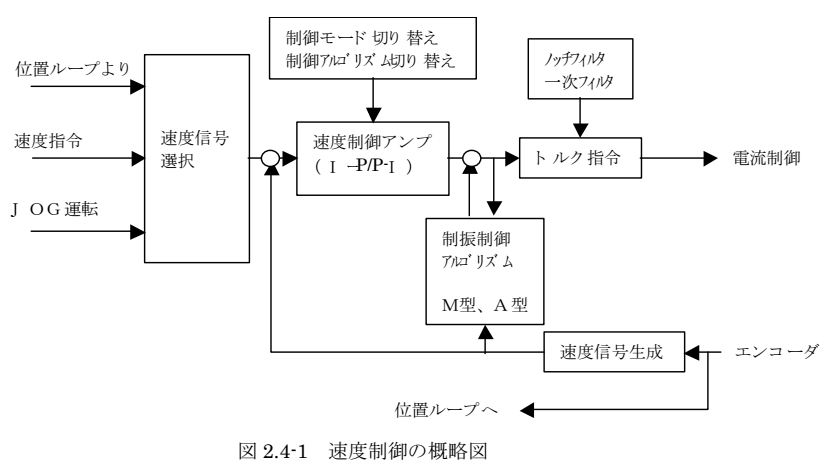
电流控制在以前是各自的相电流传感器信号进行反馈控制, ΣⅡ以后3相对2相变换，取2轴作为直流进行控制。电流控制是控制环路中最内侧的控制，对环路外侧的速度高速控制是必要的。控制的基本标准是希望的频率特性的10倍以上的运算周期控制是必要的。例如电流控制1000 Hz的f特别想获得运算周期最低100μs以下，速度控制的f最低4 倍以上的f特别有必要保证。另外,电流的控制精度几乎和扭矩的控制精度有直接联系的，电流反馈分辨率有必要考量在内。

另外,电流波形的好坏影响产生的扭矩。电流DC成分或正弦波发生扭曲,附加成分发生扭矩。电流波形扭曲原因,与电流检测精度和PWM放大器的功率元件的ON / OFF的影响有关。这些的影响,可采用补偿,采用电压环路等的增加而改善波形。



输入有转矩滤波和转矩限制，有非干涉补偿，和死区补偿等

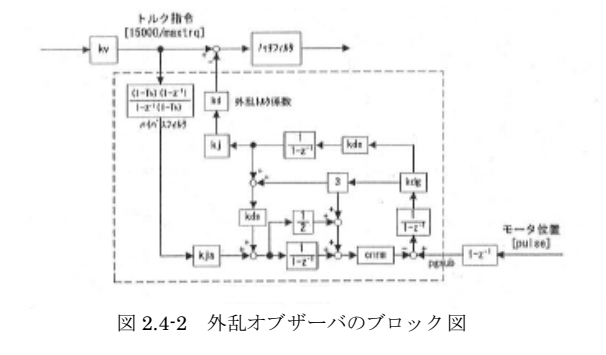
## 2.4：速度控制

速度控制在电动机的速度控制゚中非常重要。通常是电动机和负荷被连接起来，所以受到荷载的惯量或固有振动、摩擦、背高峰等各种负荷的影响受到影响。为此,控制性能要求不断提高,提出各种各样的控制方法。速度控制的要求包括速度响应、速度控制精度、速度控制范围等,它们在速度指令的分辨率、编码器分辨率、运算周期等基本要素加上控制方式等。其中,可以看出,速度控制中有控制方法的切换，振动抑制算法，

### 1：外乱观测器

从外乱负荷产生的扭矩并对其观测，可以使得外乱对应的扭矩所发生外乱的影响减小。

速度环的输出(扭矩指令)和实际速度,输入适当的函数,通过外乱推测其扭矩,相当数量的指令加在反方向的扭矩上可以抑制外乱成分工作。

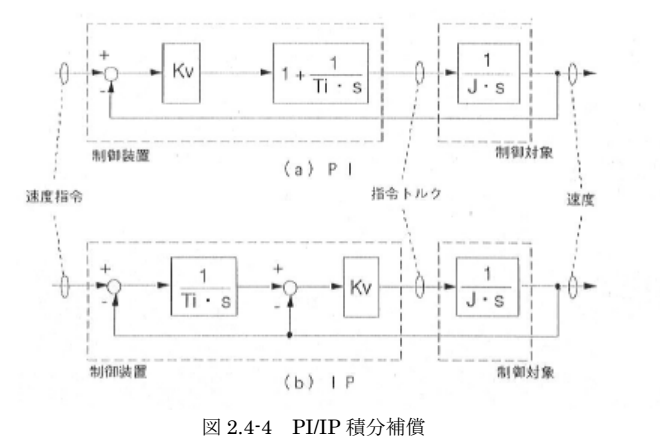


### 2：陷波滤波器

陷波滤波器是高通和低通滤波器的组合，对电流指令进行滤波，可在特定的频率ゲイン采取小的效果。负荷关系确定的固有振动频率场合的那个频率成分有抑制的效果。但是，根据频率状态变化的情况会失去效果，所以需要注意。

### 3：PI/IP控制

为了减小指令值的偏差,因此通常加入积分补偿。 图中是PI动作和IP动作。使用PI的场合比IP响应快但是伴随基本的超调。因此被要求根据需要使用PI还是IP。



## 2.5：位置控制

位置控制是电流、速度等的控制环路的最外侧位置，因此控制响应比其它环路慢。

位置指令和位置传感器的反馈进行面对面地控制。通常的位置拥有定常偏差形式控制环路，ΣⅡ+以后组合可实现位置偏差为零的控制。位置控制是定位精度和轮廓轨迹的控制精度，和到达最终位置的时间等特性为基准。因此,为了提高特性的需要在几个控制方法上下功夫。

位置的指令值与实际轨迹的偏差尽可能小的手法和位置整定时间快的控制方法有前述的零偏差控制、前馈控制、预测控制、模型跟踪控制等。

伺服驱动器的负荷系统的刚性一般很高，负荷频率共振数一般在数百Hz以上，也不能无视低的共振频率。

速度控制系统的内部的过滤器(1次、2次、陷波等)和外乱抑制控制等需要根据负荷的特点和客户的要求,考虑适用哪个方法,区分也是必要的。

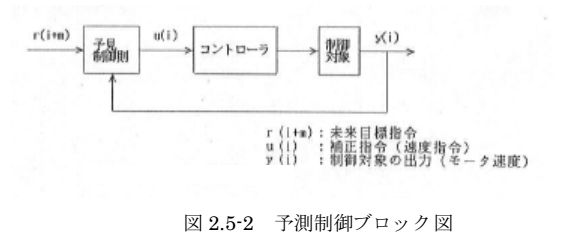
位置控制的周边控制问题概略：

### 1：无偏差控制

一般的无偏差方法,误差的积分产生操作量最终使得错误差距被修改。位置环路中利用积分要素减小偏差的光滑方法在ΣⅡ以后将被引入。

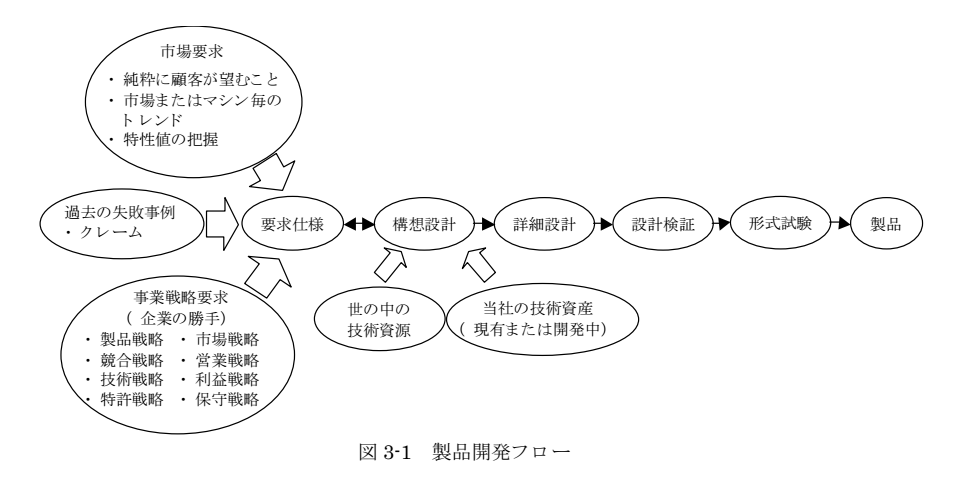
### 2：预测控制

负荷指令的动作，为了尽可能缩短，负荷模型预测的输出和目标指令的眼睛一样，给予补正指令使得偏差尽可能少的方法。



# 3：要求规格和构想设计

其中要求规格和构想设计是新产品成功与否的关键，要求规格和构想设计不是单一方向流动的，要求规格分解为实现手段的设想设计的结果反过来可以要求变更规格，这个阶段的输出是商品企划、产品企划书 ,但两者一体的产品企划书比较常见。要求规格和构想的设计捕捉来进行周密地制定好规划重点。以下是ΣⅢ产品的企划书参考了企划的要点说明。



## 3.1：要求规格

要求规格从市场开始被要求规格和事业战略开始被要求规格,再加上索赔等过去的失败案例来改善要求规格。要求规格书被综合制定。制定要求规格上,应该留意以下阐述。

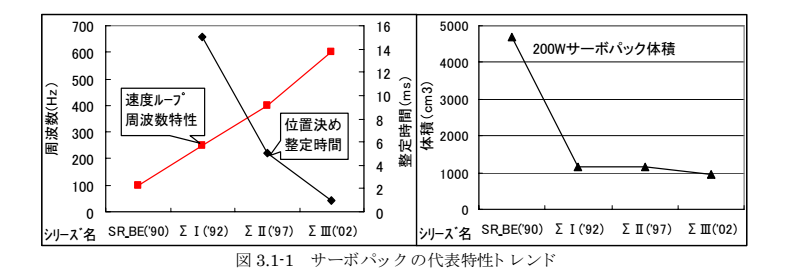
### 1：市场的要求规格

市场的要求是伺服的适用对象不同，另外同一种类的机器用户操作机器的方法不同，并且伺服的要求事项也不同。反过来一样，如果细节没有捕捉到，那么大的要求和真正价值有可能被忽略。通常,要求规格是产品供给的一方的想法比较多，而顾客的愿望不被认为有很多。首先,业务战略方面却忘记了，开始听到客户真挚地声音是很重要的。他们的要求规格最好阶段性的移动。

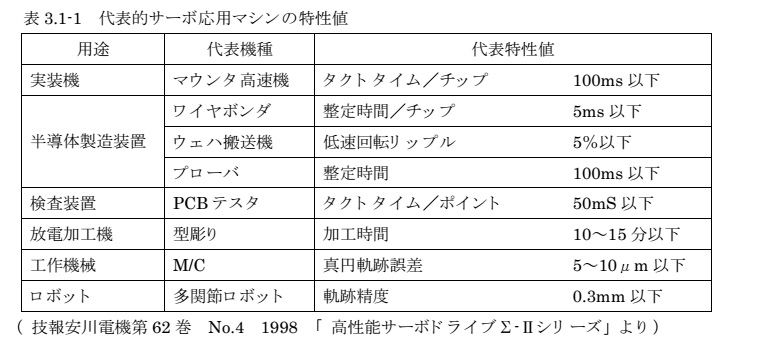
客户直接的声音是最近的要求，或是竞争对手公司的规格所没有的。但是,新产品在开发期间在内的3、4年之前没有通用的产品,所以应外

插客户的要求是将来市场趋势，必须掌握。没有规格的产品市场的阶段已经过时了，并且是没有魅力的产品。

另外,原有产品的技术趋势理所当然应该是顾客次期待的产品趋势，产品开发的发展蓝图，掌握客户的需要，在自己的长期性的技术开发上展开产品的开发。



要求规格是伺服特性值，尽可能的将规格数值化是必要的。伺服性能规格应该按照客户机器的特性值展开。这些机器的伺服性能实现的需要电机、编码器、控制各部分的规格要求分摊。



### 2：事业战略的要求规格

事业战略要求：规格产品战略、市场战略、营销战略、竞争战略、技术战略、专利战略, 利润战略,保守战略等多方面的观点的表达

市场要求规格来通过这些过滤器根据业务和战略的要求规格被决定是否执行。

产品战略是新产品的展示品，新产品的产品定位是否明确的要求。伺服产品和消费品是不同对象的产品， 需要寿命期间稳定的产品供给和保守服务要求。产品特殊场合的模型变换，现有产品的兼容保留程度， 改善内容的选择? 是困难且重要的判断点。

市场战略、营销战略、利润战略是事业的主干,哪个市场有多少销售, 那些利益是确保的。特别是最近的伺服市场应用范围的扩大,广泛的、高性能要求。因此,一个系列的产品覆盖全市场很难，从产品企划书中提到在ΣⅢ工作机械,半导体,机器人3市场，并分别区段化来应对产品系列的设定。这些市场的特性和产品的规格的设定和成本。

另外,技术战略方面从3种系列产品开发，开发成本，交货期，制造成本的观点，从技术和部件，制造工艺和生产设备的公用化要求作为项目的反馈。市场每个区段化的产品,如何有效开发和制造,并讨论如何满足产品规格。

竞争战略中，竞争对手公司的现行产品的定义，将来的发展趋势也需要探寻。了解竞争对手的公司，开发的产品可以对抗其他公司产品的科研，并开发差异化产品。各个公司的技术的重点分析等。



### 3：失败案例的改善要求规格

失败的原因，在设计阶段存在的问题。制造阶段的故障。规格设定阶段市场要求没能充分捕捉到等。前2者产品发行后每次被不断的改善，规格设定阶段市场要求掌握不足的改善是产品推出之后,对客户和业务影响最大。整理缺陷项目一览表，市场要求掌握不足的问题需要在新产品的要求规格中有必要的反映

客户往往超过了产品规格的使用。现实的产品的使用环境受各种各样的因素影响，不能一概而论。使用环境超过产品规格，制造者是没有责任的,但这不是客户看问题的方式。通常,客户是任性的，希望能够满足他们的要求

### 4：规格项目

规格项目以现有机型的产品规格说明书的项目和可靠性设计规格项目为基础,新的要求规格项目在上面追加。ΣⅢ的产品规格和可靠性设计规格项目看各自后节的表4.1.1和表 4.1.2。

## 3.2：构想设计

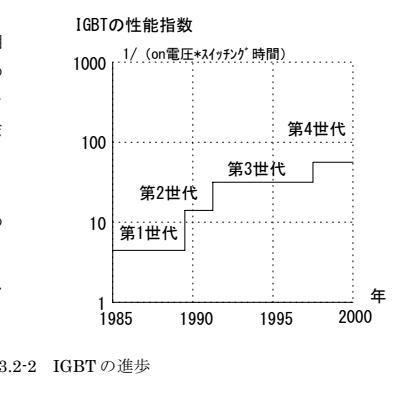
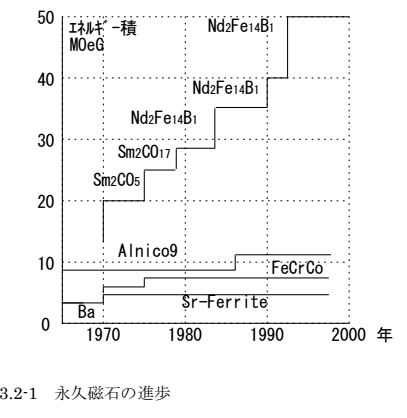
在构思设计要求根据规格实现手段来开展产品的框架决定。实现手段的结果要在项目中进行检讨、设定开发周期中的现有开发技术和实际实施时的困难大部分情况下很难判断。在这种情况下要求合理的对规格进行研究,并有必要重新设定。

伺服马达和伺服机构包括,马达,马达伺服编码器和伺服放大器和操作员面板和网络接口等,另外其他回馈抵抗和电源,连接电缆、工程工具等众多产品群构成。需要在构想设计中确定哪个部分需要实现。特别是,伺服机构的性能和成本与马达、伺服放大器的性能,编码器等息息相关。有的性能部分最适合，所以需要找到性能的最优解。

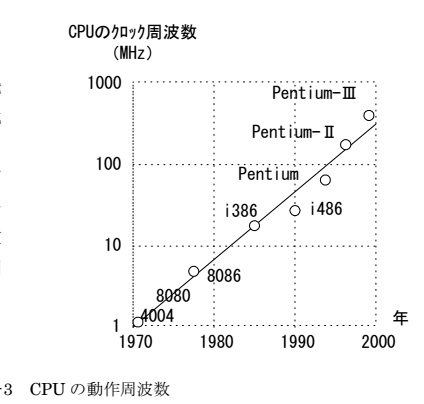
实现手段是现有产品中积累的技术资产和现在正在开发的技术及世界存在的技术来源，采用最有效的技术。新的不足的部分进行技术开发也有必要研讨,开发周期长,是否会损失机会,这种技术对产品的价值是否有明显下降等有必要研讨。

伺服产品从其他公司采购主要零件然后合成为总产品的性质很强。特别是伺服这样的电子产品是和半导体部件产品的寿命相关的。半导体的进化伴随着性能提高,小型化,大容量化,更便宜。在这个意义下，能使用的技术，配件，开发产品的量产阶段的稳定供给、成本、可靠性，能充分满足要求等指标需要考虑。

伺服机构的性能、成本、可靠性影响很大的伺服马达用的磁铁及伺服放大器用的IGBT和CPU的技术动向,图3.2-1,图3.2-2,图3.2-3。 (ΣⅢ产品企划书精选)



IGBT开关时间，和电压等级



### 3.2.1：马达、PG和接口

### 3.2.2：伺服性能设计

伺服机构的性能指标

1）：力的转化

马达的，额定扭矩，电机惯量 Trated^2/Jm

2）：最大扭矩

马达和放大器的，通常为250 ~ 300%

3）: 频率响应

速度环：伺服比例Kv（ Nｍ／r/s）,转动惯量J 。Fc=kv/2πJ，所以Kv =2π\*f\*J。使用时一般在100 Hz 以下

电流环：速度环路的频率特性的2倍以上,最好4倍以上。电流的增益Kc（ V/A）由电机的电感决定。小容量1.8 kHz机种,大容量机型设计900 Hz。

4）：扭力精度

指令的扭矩，发生波动的指令扭矩值除以指令扭矩，绝对精度为±10 %

重复精度为1%（不含波纹）

5）：波纹

脉动转矩

马达的，与额定转矩比率，平均1% pp

转矩波动

马达和放大器的。10 % pp

速度波动

与转矩波动和放大器的控制相关，设计验证的参考数据取得

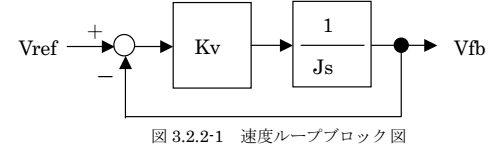
力量的转化和马达最大扭矩和伺服放大器的设计属于功率部的构想内容，在这里是伺服放大器的控制部的构思设计,以频率特性和转矩波动问题进行讨论。

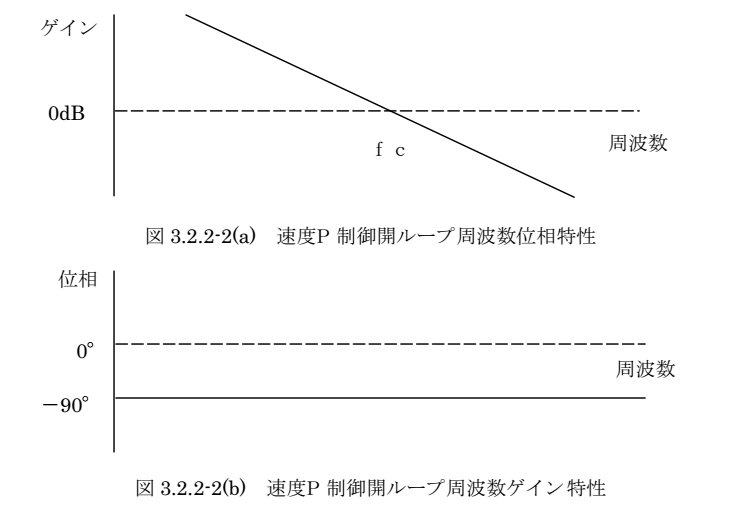
#### 1）：速度环路的频率特性

这里是马达单体或马达和负荷的结合的刚性较大的机器,共振等，速度环路的频率特性的探讨。框图如下。(简单的比例(P)控制)

其中Kv:速度增益(= 2π\*fc\*J fc =截止频率(Hz)

开环路频率特性和相位特性分别

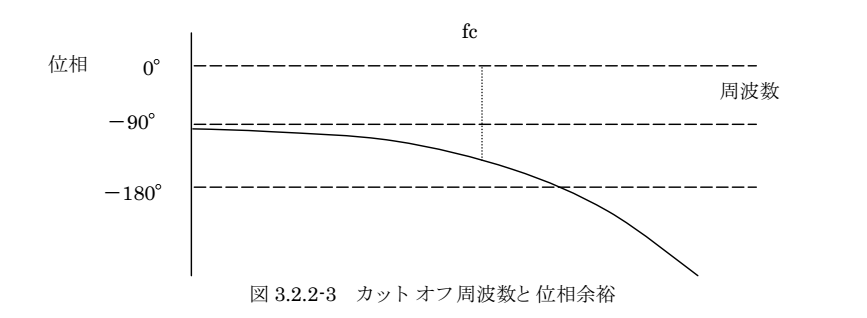




在实际的伺服系统中各种时间,相位延迟进一步推迟。

一定时间的延迟(浪费时间)，频率和相位延迟成比例。时间延迟Td(s)的时候,对应F[Hz]的相位延迟，360\*Td\*F[°]。也就是 w \*td= 2πf \* td = 延迟的相位

截止频率的相位裕度是在截止频率下的相位和180之差。超过180度会产生震荡，到震荡为止，kv可以提高，kv提高fc也会提高。相位延迟150°(相位剩余30°)以下频率应答时可以减小超调，也可以减小阶跃响应的时间。那么要求频率特性，在截止频率处的相位延迟需要考虑时间的延迟。即使没有振荡，相位滞后大并且接近-180°时,在某种程度上也会成为振荡。



实际的伺服机构中存在这样的时间延迟如下：

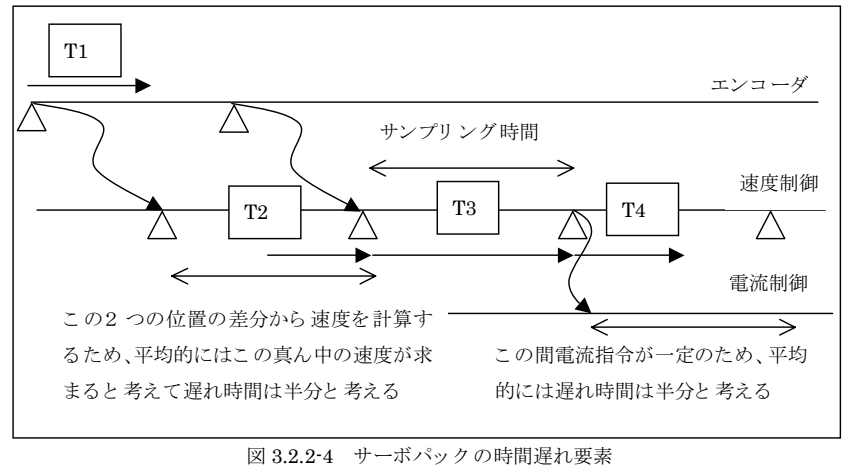
1：通信编码器传输延迟T1

2：位置差分（为了计算速度）延迟 T2

3：速度环路计算时间延迟 T3

4：阻挡时间延迟（输出会有一定时间的延迟）T4

5: 电流环路的延迟(检测和计等的时间延迟及电流环路的频率特性)



第一行是编码器采样，第二行是速度控制，第三行是电流控制，三角形间隔代表采样时间。

电流控制注释：因为在此期间电流指令是恒定的，因为还没有到下一个速度环输出，平均延迟时间是一半，周期内相当于是平均电流。

速度控制注释：计算差分速度，区间内的平均速度被计算，所以延迟时间认为是半个周期。

T1是编码器采样后到进入速度环的时间，

T2就是采样两次编码器后能够计算差分速度的延迟时间

其中,T 2和T 3和T 4是速度控制的取样时间被延迟时间来决定，通过一些理论方法有可能可以缩短。速度环要求的fc对应需要的采样时间有必要的、要选定合适的微型计算机等

举例说明：速度环频率特性为fc = 400hz的时候，可接收的延迟时间计算，因此转矩到电流的积分相位滞后90度，所以如果相位裕度为30度，那么环路的延迟只能够是180-90-30 = 60

所以360\*Td\*fc = 60

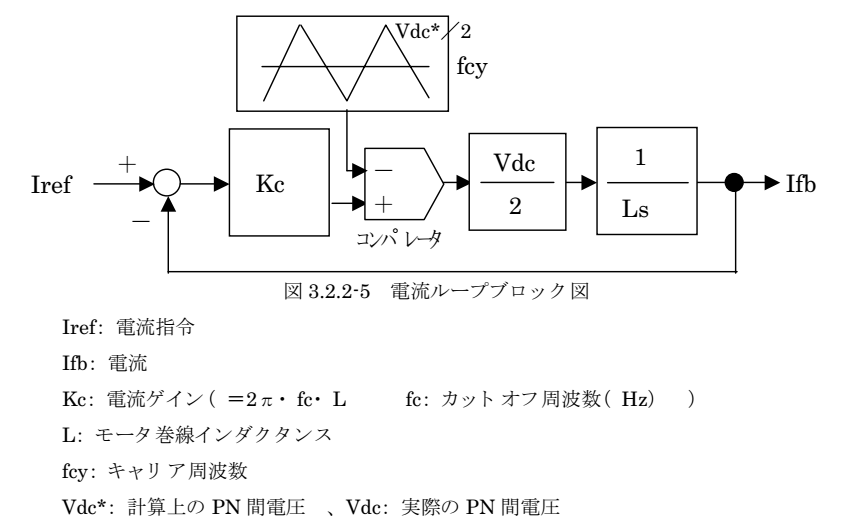
td = 416us，因此环路所有延迟需要满足T1+T2+T3+T4+T5≦416μsec 其中T5是电流环的延迟

经过估计T1+T2+T3+T4+T5=50＋62.5+125+62.5+79.6＝380μsec，可以满足要求，其中T2和T4是半个周期，T3是一个周期，T5是电流环至少延迟一个周期再加上采样和计算的一些延迟。

#### 2）：电流环路频率特性

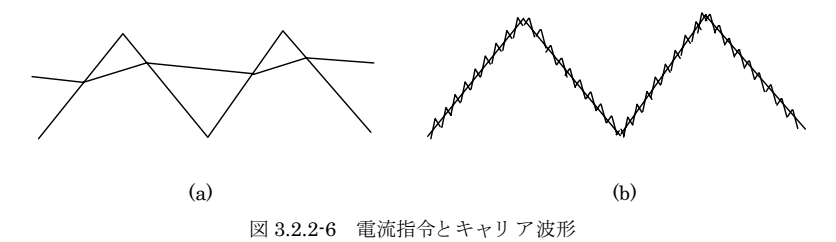
考虑电流环路的频率特性。框图如图3.2.2-5。（忽略了电机电阻所以简化为比例（P）控制。实际上是3相,所以会比这图复杂,只考虑时间看这个方块图探讨更方便。

注：如果是三相，不同开关时刻那么有两个绕组并联和一个绕组串联，那么串联电阻上的电压是并联电阻的两倍，所以需要补正电压（ 2Vcc/3）/（ Vcc/2） =1.33，如果电压由回馈，那么390V/280V＝1.39，所以这部分差额也需要补上。



通过和载波进行比较。

比较器正侧大的时候输出1，正侧小的时候输出-1.当kc小的时候比较器输出波形如图a所示。当kc变大的时候，电流倾斜的斜率变大。如在情况图3.2.2-6（b）中的电流，IGBT跨载体的三角波连续的接通和关断，粘贴现象发生在三角波。这是IGBT的开关数大大超过了载波频率，必须绝对避免，因为损失增加。有时电机的磁体由损失被消磁。



载体的斜率为Vdc\*·2·FCY，斜率计算 =((Vdc\*)/2)/(1/(4\*fcy)比较波形是倾斜的Vdc/2/L\*Kc

所以载波的斜率比实际波形的斜率要大是必要的

fcy ＞ Kc/4/Ｌ・ Vdc/Vdc\* 其中kc =2\* pi \*fc\*L

fcy ＞ π/2・ fc・ Vdc/Vdc\*

为了增加下电流环的频率特性，有必要成比例的增加载波频率。Vdc / Vdc \*通常是1。

更高的电源电压，在再生过程中的电压的增加，都有必要在确定载波频率的时候考虑。

举例:如果截止频率为1.8khz

fcy＝（（ 2Vdc/3） /（ Vdc/2））×（ 390/280）×1.8kHz×π/2＝5.5ｋ Hz

#### 3）：扭矩・速度波动的发生原因

1：扭矩波动发生原因

1）由于电机

由于磁不平衡齿槽转矩

电动机的感应电压的高次谐波分量

2）由于电流

死区影响

电流偏移

电流含有高次谐波

三相电流不平衡

2：速度波动发生原因

转矩波动

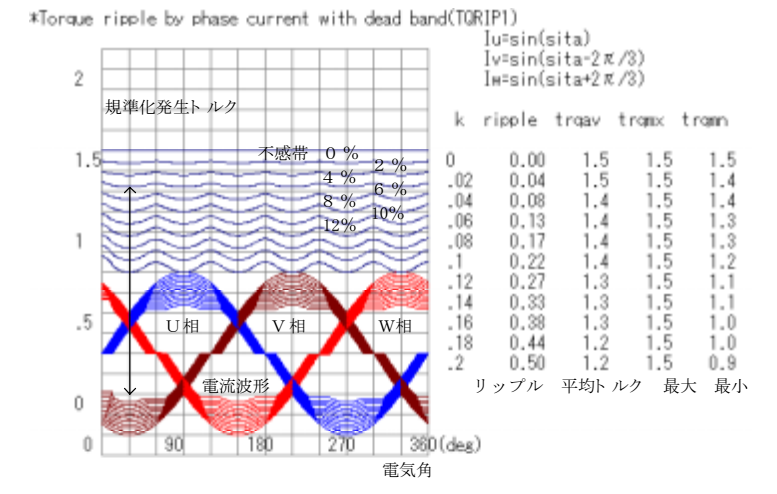
速度检测精度

以下详细说明：

##### 1：由于电流导致的

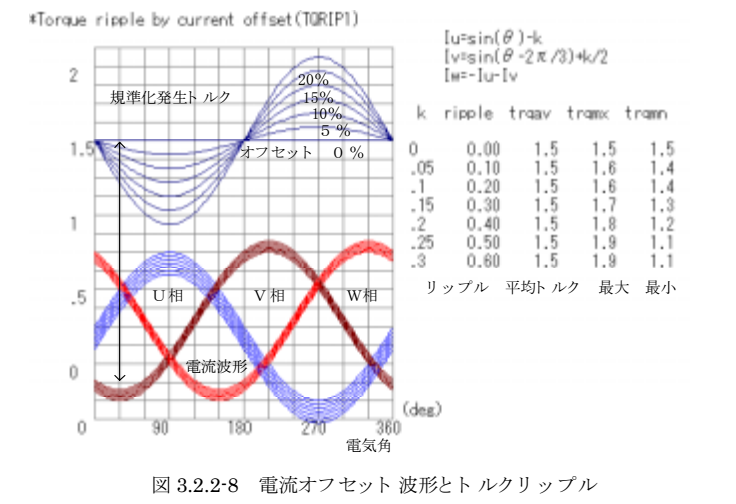
（a）由于盲区的转矩脉动

为防止上下臂晶体管的短路在PWM开关电路提供禁止时间，但由死区出现在电流控制中导致电流波形失真。大约1%的死区可以引入2%的波动，死区越大，波动也越大，因此死区补偿是必要的。



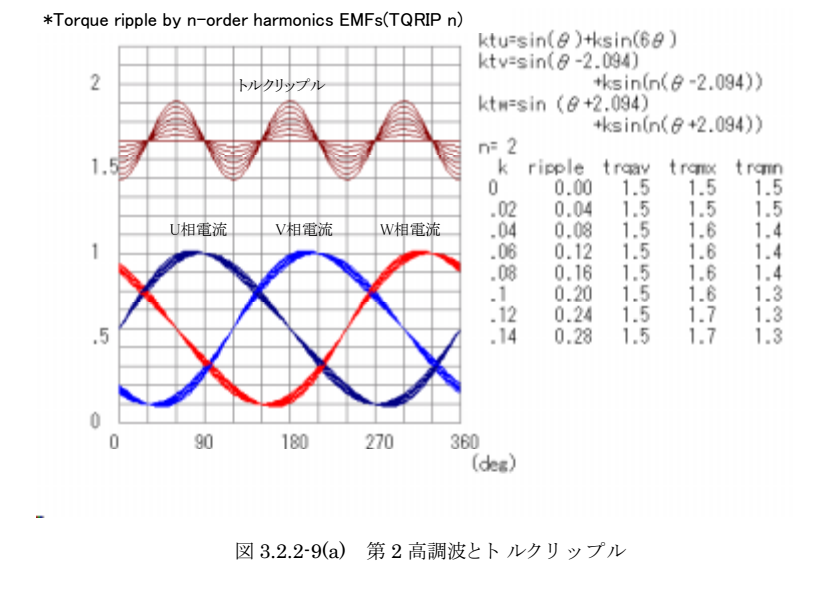
（b）电流偏置导致的转矩波动

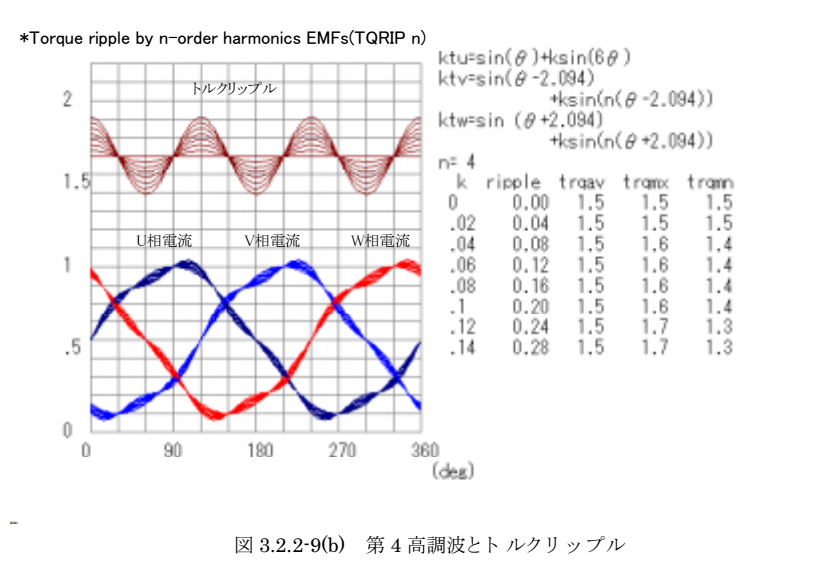
直流分量引起的转矩脉动，波动的频率和电流的频率一致，1 %的偏置导致2 %的转矩波动产生，充分考虑电流检测器和AD转换器的DC分量漂移，从而确定波纹的比率。

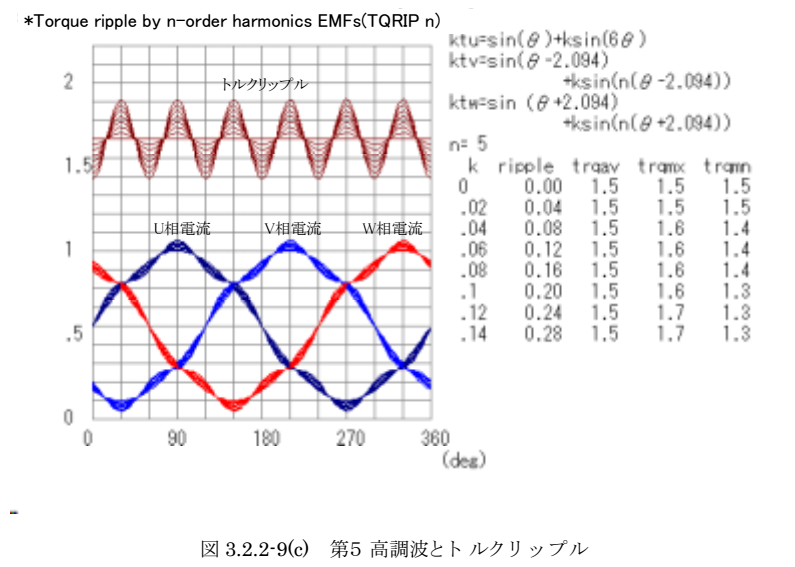


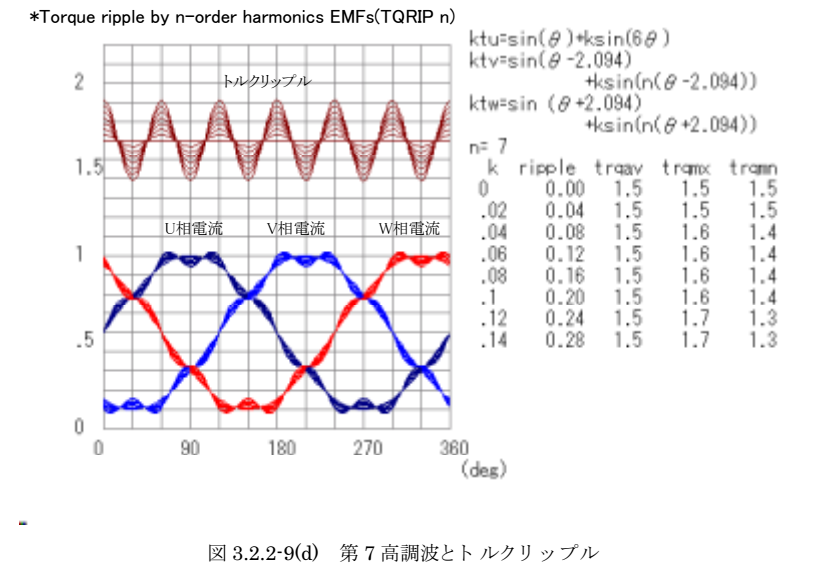
（c）谐波的转矩波动

电流和转矩系数含有高次谐波的成分是引起转矩脉动的原因。第二，第四高次谐波是电流频率的三倍，第五，7次谐波是电流频率的六倍。1%高次谐波可以产生2%的转矩波动，3的倍数的谐波的波形会抵消。根据谐波分析波动。



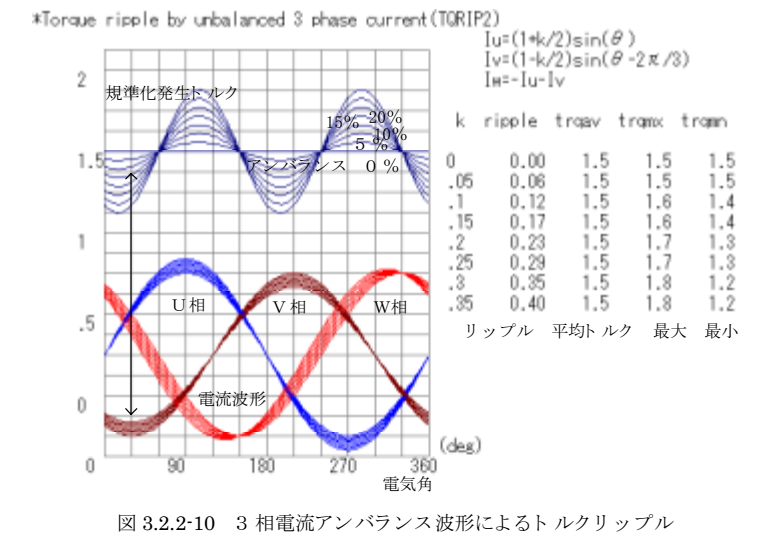






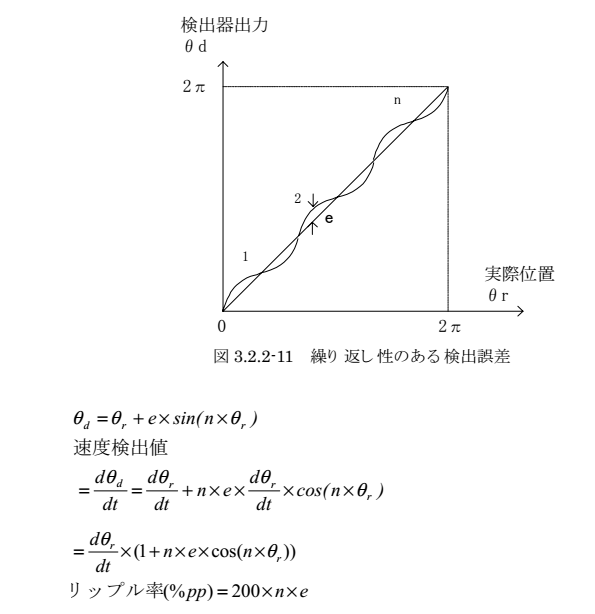
（d）三相电流不平衡

转矩脉动的原因时，有对三相电流的振幅的不平衡，有的大有的小。波动频率是电流频率的两倍 ，1%不平衡导致1.2%的转矩波动产生。



##### 2：位置检测器导致的速度波动

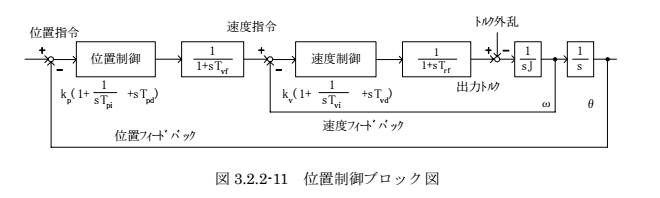
位置检测的准确性不仅影响定位精度还会影响速度精度，因为通过（差分）作为速度反馈信号。特别是，编码器或分解器导致的周期性位置误差，是速度波动，转矩脉动，振动和谐振的原因。例如，当偏差是每转一次的时候，是安装在电机轴上的检测器的同心问题。如下图所示的，如果位置检出时如下波动，那么速度波动就可以通过下式计算。通过内插编码器和插值正弦检测信号来提高分辨率的方式容易受到内插误差的影响，需要注意。正弦波的扭曲,应尽力减少，失真的情况下,内插误差校正看起来是必要的



因为cos峰峰值是2

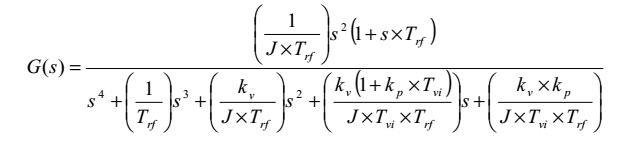
##### 3：通过控制增益抑制转矩脉动

由于转矩脉动产生的速度误差，位置误差可通过控制增益被抑制。在以下附图的框图中是施加转矩扰动时的传递函数。

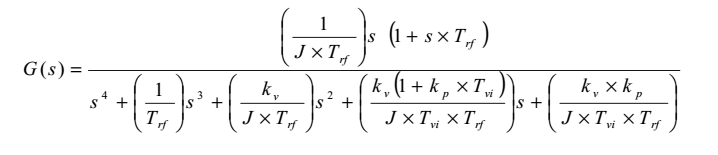


以下都是输入是扰动

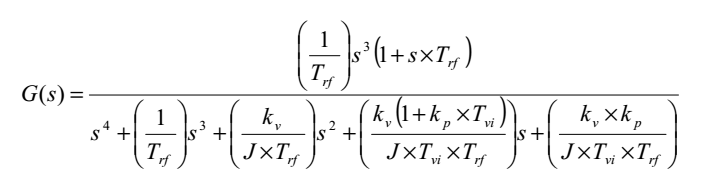
速度的传递函数



位置的传递函数



转矩的传递函数



转矩指令的传递函数

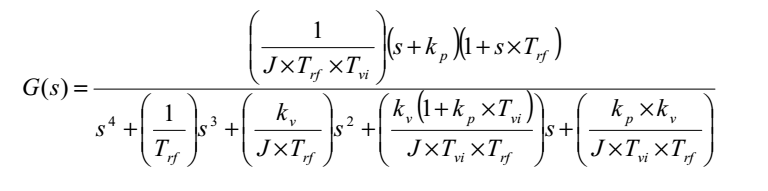
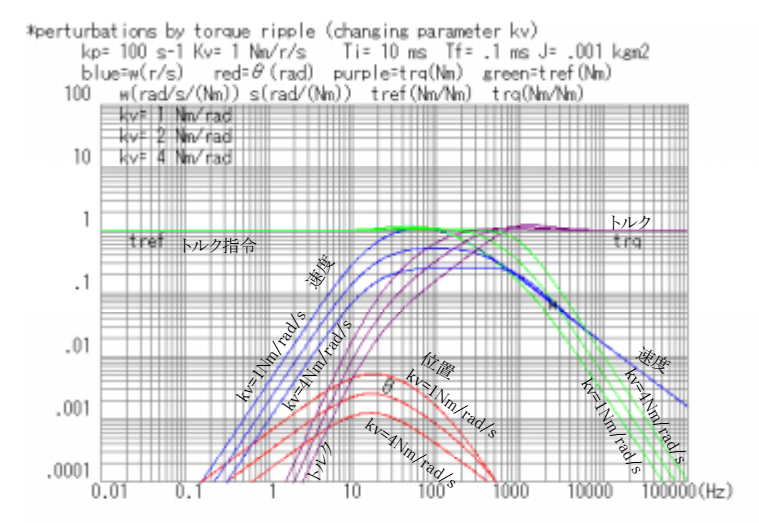
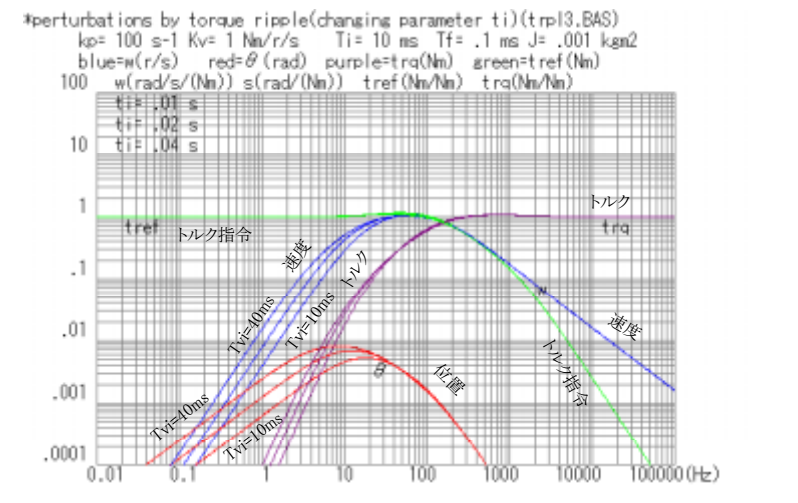


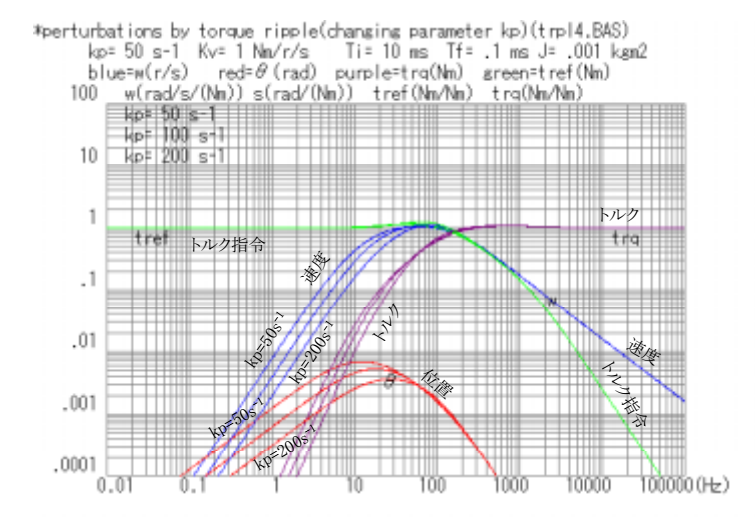
图3.2.2-12显示的是外加1NM的扰动转矩的时候，参数不同的时候 对位置，速度，转矩反馈，转矩指令的频率响应。对于伺服带宽外的抑制几乎没有，而对带宽之内的抑制很好。



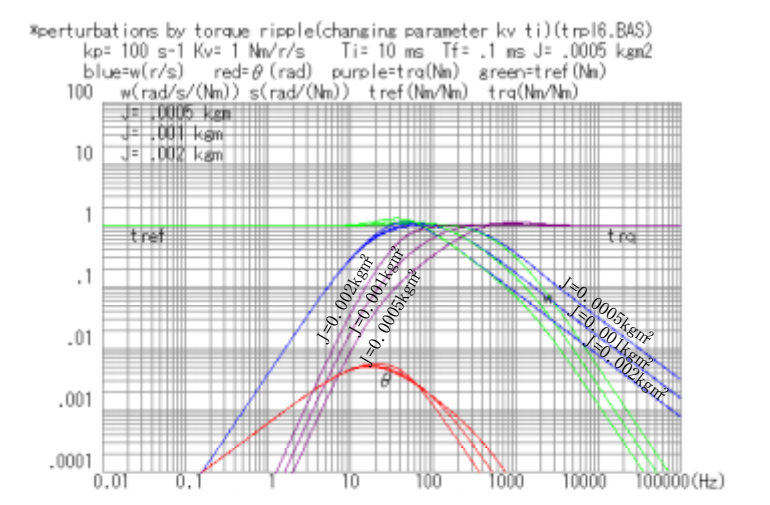
上图是更改kv，kv越大，对扰动抑制越好。



上图是更改速度环积分的时候，积分越大，抑制越好。



位置kp越大，抑制越好



惯量越小，转矩抑制好

通过上面这些图有助于在我们分析位置精度的影响时，确定是否是转矩脉动导致的速度波动和位置误差。

### 3.2.3：功能设计

### 3.2.4：软件和硬件设计共享

伺服主要特性随着时间的推移的演变

|  |  |
| --- | --- |
| 系列名 | 全数字交流伺服---sigma系列 |
| 电流环频率响应 | 250-700-1800hz 更高 |
| 速度环频率响应 | 100-250-400-600hz 更高 |
| 位置整定时间 | 15ms – 5ms -1ms |
| 速度-转矩线性度 | 正负10% -3% |
| 转矩重复精度 | 2% -- 1% |
| 旋转波动 | 10% |
| 转矩波动 | 1% - 10% |
| 伺服体积 | 越来越小 |
| 速度控制范围 | 1：1000 ---1：3000 ---1：5000 |
| 电流检测位数 | 9-10-12 |
| 转矩指令位数 | 14—10 为何减小的趋势 |
| 速度指令位数 | 16bit |
| 电流环计算时间 | 21.3us – 16us – 64us |
| 速度环计算时间 | 450us – 250us –125us – 64us |
| 位置环计算时间 | 500us –250us |
| 编码器的分辨率 |  |
| 载波频率 | 3.3khz – 11.8 – 11.7 –更高 |
| CPU（时钟频率） | 16m – 30m – 48m 更高 |
| Asic | 门阵列（2万门）--4万—7万-26万 |
| 功率元件 | 功率晶体管--IGBT |

### 3.2.5:CPU的选择

内存容量，计算能力的评价，选择之前CPU的原因

### 3.2.6：硬件的配置

### 3.2.7：ASIC

### 3.2.8:软件的构成

# 4：详细设计

为了解释最新的型号Σ-ⅢB型伺服包SGDS-02F的专门内容。

一般伺服的power电路部分根据电源与容量的不同而不同,控制部分几乎相同。输入输出接口，有无特定功能，电源电压,控制电源,底板尺寸等的规格多少有一些变化。基本设计内容普遍很容易在水平方向扩展该示例模型到另一个模型。

在这一章里设计时应该注意将SGDS不同部分的具体的产品设计加上说明,应该注意的地方需要作为一般理论进行扩大内容讲解。有些也适用于其它的场合，不能够涵盖所有在这本书中。就像前面所说的那样，我们希望当你在读其他东西的时候，你能将这些内容适用于更多的情况下。

## 4.1：额定值和规格

### 4.1.1：产品规格

表4.1.1-1 伺服规格

|  |
| --- |
| 基本规格 |
| 驱动器适用的最大的电机容量[kw] |
| 不同输入电压的时候的连续输出电流Arms |
| 不同输入电压的时候的最大输出电流Arms |
| 输入电源的类型：是单相输入，还是三相输入， |
| 输入电源的波动：+10 ～ -15% 输入电源的频率50/60 Hz |
| 控制方式：单相全波,倍电压或三相整流，PWM控制，IGBT，正弦波电流激励方式 |
| 反馈：串行编码器17位（增量/绝对值） |
| 使用条件：使用保存的温度，使用保存的湿度，耐震动和耐冲击性4.9 m/s2/ 19.6 m/s2 |
| 构造：底座安装附件 |
| 性能：速度控制范围 1：5000 （速度控制范围的下限，条件是不要在额定转矩负载时停止） |
| 性能，速度变动率，分三种情况：  1：负载变动：0 ~ 100%负荷时，:±0.01%以下(额定旋转速度)  2：电压变动 ：额定电压波动±10%，速度波动0%(额定旋转速度)  3：温度变化：25±25℃: ±0.1%以下 (额定旋转速度) |
| 性能：频率响应：600 Hz（ at JL = JM ） |
| 性能：扭矩控制精度(再现性) ±1% |
| 性能：软件设定的开始时间 0 ~ 10 s(加速、减速可分别设定) |

|  |
| --- |
| 内置功能 |
| 动态制动器（DB）功能：主电源关闭，伺服报警，伺服OFF，在超程功能操作的时候 |
| 再生处理功能：内置或者外置 |
| 超程（OT）防止功能：P-OT，N-OT操作DB停止，减速停止或自由运转停止，（正负限位） |
| 电子齿轮：0.001 ≦ B/A ≦ 1000 |
| 保护功能：过流，过压，欠压，过载，再生异常，主电路检测单元异常，散热片过热，电源缺相，溢出，过速，编码器异常，防止失控，CPU异常，参数错误，其他 |
| LED显示功能 ：charge，5个7段LED，内置数字操作功能 |
| 其它：反转连接，原点搜索，电机自动识别功能 |

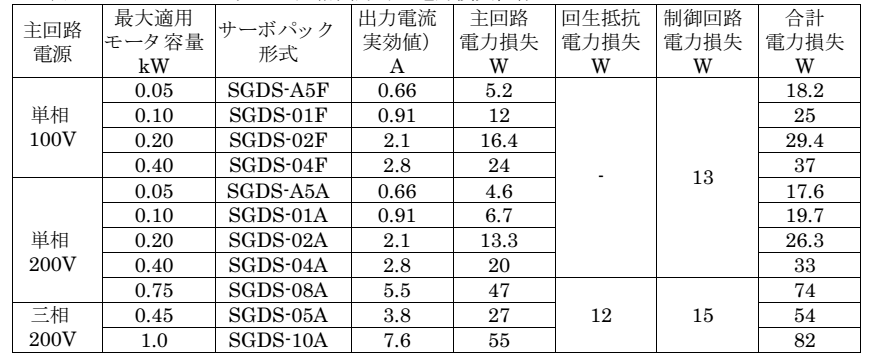
速度波动速率由下式定义。

速度变化率 =（空载转速-满载转速）/额定转速×100％

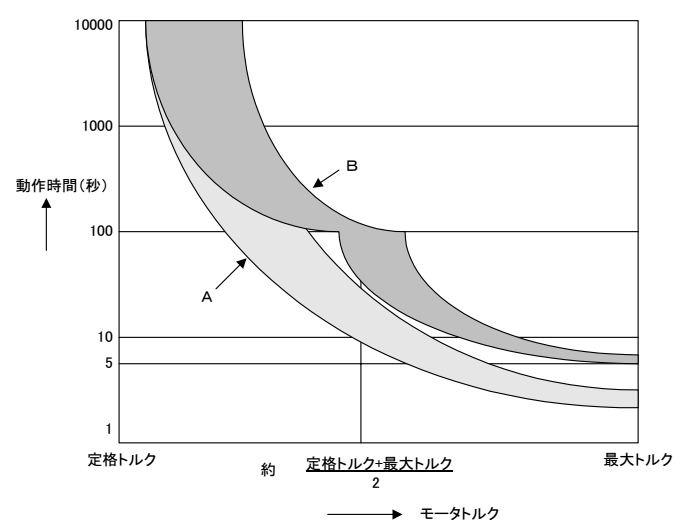
事实上，因为电压波动,温度变化或运算放大器漂移值的改变，会反应在旋转速度的变化上。在额定速度下，如果能将电压变化的速率对旋转速度的影响去除掉，那么该速度变化率就是因温度变化所产生的。

|  |
| --- |
| 转矩，速度，位置控制 |
| 转矩控制：输入信号：指令电压 (DC±1 V ~±10 V:可变设定范围) |
| 转矩控制：输入阻抗：14k欧姆 |
| 转矩控制：电路的时间常数 30 μs |
| 速度控制：性能：软启动时间设定，0 ~ 10 s(加速、减速可分别设定) |
| 速度控制：指令电压：(DC±2 V ~±10 V:可变设定范围) |
| 速度控制：输入阻抗：14k欧姆 |
| 速度控制：电路的时间常数 30 μs |
| 速度控制：方向选择，速度选择（没看懂） |
| 位置控制：性能：偏置设置 0〜450min-1（设定分辨率1min-1） |
| 位置控制：性能：前馈补偿 0-100％（设定1％的分辨率） |
| 位置控制：性能：定位结束宽度设置 0到1073741824指令单位（设定分辨率1指令单位） |
| 位置控制：输入信号：指令脉冲：  输入脉冲种类：方向+脉冲，CCW+CW脉冲，90°相位差2相脉冲（A相+ B相）选择一种  输入脉冲形态：非隔离驱动 5v电平。  输入脉冲频率：高达1 Mpps的（非隔离驱动） |
| 位置控制：控制信号：清零信号（输入脉冲形式，相同的指令脉冲） |
|  |
| 输入输出信号 |
| 输入输出信号：位置输出，A相，B相，C相：线驱动输出 分频比：任意分 |
| 输入输出信号：顺序输入信号：信号分配的变化，信号有：伺服，P动作（或控制模式切换，内部设定速度（电机运行正向/反向切换），零钳位，指令脉冲抑制），正向驱动禁止（P-OT），反向驱动禁止（N-OT），报警复位，正侧电流限制，反侧电流限制 ，内部速度选择，增益开关 |
| 输入输出信号：顺序输出信号：固定输出：伺服报警，报警码（3位）输出  信号分配的变化：定位完成（同速），电机正在转动，伺服准备好，电流限制中，测速预警，near信号，可以选择三种类型的信号 |
|  |
| 其他 |
| 观察用模拟监控功能：  速度，内置观察，模拟显示器连接器，如转矩指令信号  速度：1 V/ 1000 min-1的  扭矩：1V /（额定转矩的100％）  滞留脉冲：0.05 V / 1指令单位（误差？） |
| 通信功能：连接方式：数字操作器（手持式） 功能：状态显示，用户常数的设定，监控显示，报警显示追踪，JOG操作 |

4.1.1-2图中是伺服在额定出力的时候的电损失



50W〜400W的伺服组不是内置的再生电阻。如果再生能量超过一个预定值时，需要在外部安装再生电阻。



额定转矩，----最大转矩

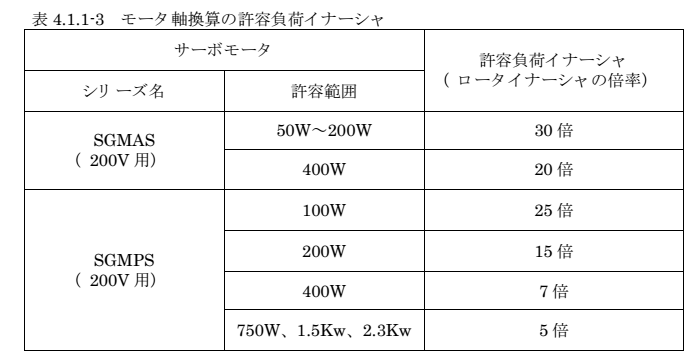
上图是伺服过载保护规格，A,B特性分别适用于不同的电机场合

A：400w以下

B：其它

过载检测在电动机的环境温度设定40℃情况下测定

表4.1.1-3换算到电机轴的允许负载惯量



负载惯量和电机惯量的比例

### 4.1.2：可靠性设计规范和安全设计规范

可靠性和安全性相关的规范是一个重要的产品规格，从市场战略和竞争战略的角度来看，在目录和用户手册中有未明确表示的规定。但最近开始PL法执行不起来也反应了它很难说出所有的一切，如内容的细节。在确定该产品规格为伺服时的可靠性和安全性之后，但客户尚未明确定义了必须由以下的内部标准进行保护的规格。

1）交流伺服可靠设计指南，产品规格设计的阶段,这些包含的项目产品规格必须反映。表4.1.2 AC伺服可靠性产品规格。实际的设计时参照最新版。

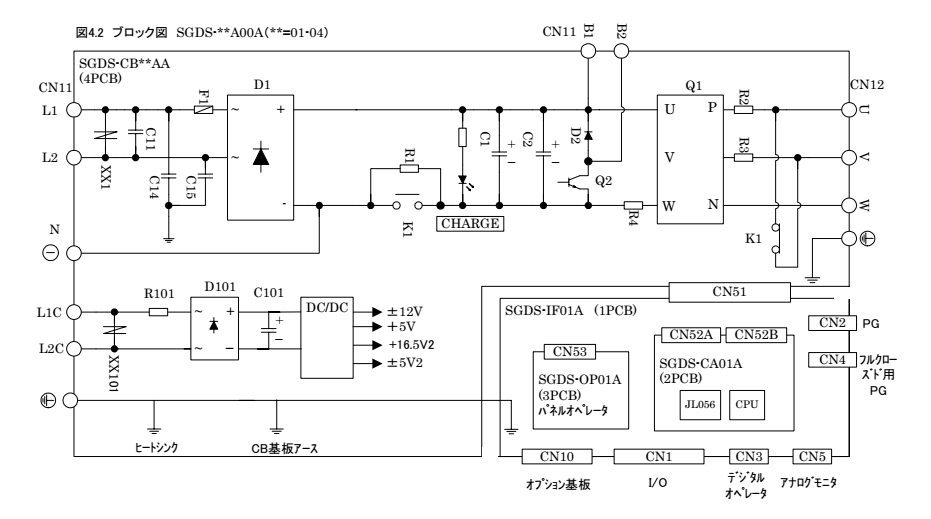
2) 伺服的产品安全设计标准. 伺服是能量控制装置，这会导致由该装置的故障或失效而导致严重事故。“伺服产品安全设计标准”是考虑严重的事故和对环境的影响，根据在FTA（故障树分析）技术总结的基础上。设计安全需要考虑的范围很广泛，有很多事情是无法表达，很难有衡量指标。通过执行基于FTA的研究设计，以针对产品本身采取措施。另外，设计完成后也可以通过本声明的清单来检查是否已经开展了需要的安全措施。

表4.1.2：交流伺服可靠性设计指南

|  |  |
| --- | --- |
| 电源 |  |
| 电源电压 | 波动 |
| 电源频率 | 波动 |
| 瞬停保证时间 | 在空载和额定转速，50ms |
| 接地 |  |
| 环境 |  |
| 使用时周围温度 |  |
| 保存温度 |  |
| 海拔 |  |
| 耐湿 |  |
| 耐水 |  |
| 耐振动 |  |
| 耐冲击 |  |
| 耐气体 | 腐蚀性的气体，可燃性气体 |
| 耐油性 | 有机溶液 |
| 防尘 |  |
| 耐火性 |  |
| 安全性 |  |
| 绝缘电阻最小 | DC500V 10M欧姆 |
| 耐电压容差 | 1500VAC(P－E間)、 3000VAC(P－S間) 500VAC(S－E間) |
| 火，烟 |  |
| 发热 | 90°C（基材表面），125°C（半导体结） |
| 防触电保护 |  |
| 漏电保护 |  |
| 在操控性方面伤害保障 |  |
| 可靠性 |  |
| 静电辐射噪声抗扰度 | 电磁辐射噪声免疫力：机壳和电缆 电力线噪声免疫力：共模，普通模式 |
| 大噪声抗扰度 |  |
| 防静电放电抗扰度 |  |
| 辐射电磁场抗扰度 |  |
| 快速瞬变脉冲群抗扰度 |  |
| 过负荷量 | 最大电流多长时间 |
| 使用寿命 |  |
| 故障率 |  |
| 保护机能 | 机器故障保护 |

## 4.2：伺服的构成

图4.2从输出容量100W到400W伺服组的200V输入电源类型的框图。



除了主功率电路以外，有操作面板，cpu板，还有扩展板的接口，数字和模拟监控部分，还有散热器部分

伺服由一个控制单元和更大的功率电路部分组成。功率电路部分由主电路和控制电源构成，在图4.2的框图被安装在印刷电路板4的PCB上。虽然在印刷电路板上设计的承受能力小，这里为的是可以被安装在该框图中表示，当涉及到大容量时，在印刷电路板中的主电路布线的容许电流有限制，可以通过电线进行布线。主电路的输入电源和（转换器）的直流变换单元和驱动交流伺服电机（逆变器）的三相部分组成，处理大电流是上述的最大的挑战。有关电源电路部分的更多信息，请参见“伺服设计手册（功率单位）。”

控制单元由1PCB，2PCB 3PCB的印刷电路板构成，功率板连接到CN51的连接器。控制单元的核是IC或LSI处理的弱信号，对噪声和热非常敏感。因为功率部分物理尺寸，还要尽可能设置电隔离，自然限制了对于小型化的市场趋势做出响应。与主机设备的连接，与反馈编码器的连接，与外部设备（例如伺服调节设备）的连接都集中在这部分，易于处理和使用，电路保护，外部噪声免疫力成为重要的设计考虑。

一般来说，从噪声免疫力的观点看，主电路和控制电路是独立的。CN51进行电气隔离。控制电源和主电路之间是隔离的，这也就是辅助电源的意义。从价格和器件安放的角度考虑，尽量减少隔离的信号线。集成的ASIC，价格便宜，使用方便，但是也有很多自身的限制。通过级联信号处理的方式来减少信号线数

2PCB上面搭载了ASIC和CPU。ASIC集成了很多离散的部分，组成了一个微程序处理器并且具有一定的内存。微程序部分负责小的采样时间。因此电流环的计算周期短，不夸大其词的说，这部分决定了伺服响应的性能。

另一方面，CPU是一个多功能的32bit的微控制器，带内部存储。负责：单独的软件接口或与ASIC的接口或与外部装置，异常处理，伺服环控制，HMI。程序不需要很高速的性能，可选的适应不同的功能模块，通过高级语言来进行描述。

## 4.3：ASIC

半导体技术的发展是显著，ASIC的集成度在过去的20年多了200倍，每块芯片的成本已经逐渐减少。但随着每个芯片集成度和元件速度的增加，一般也增加产生的热量，这个问题通过降低电源电压已得到解决。这将是能够在单个芯片中实现复杂和大规模电路，产品开发的成功与否不夸张地说，取决于该半导体科技成果的发展。

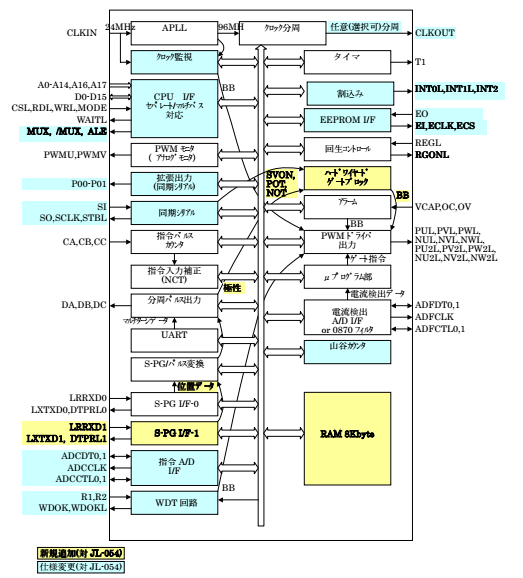
然而，在另一方面由于电源电压的降低（5V→3.3V），带来新的问题，如开发的复杂性，和对噪声敏感。应用半导体技术越来越多设计成IP来保护知识产权，同时HDL（硬件描述语言）技术已成为必要

ASIC设计时，分清楚需要ASIC实现的功能和不需要实现的功能是很重要的一点。应该从两侧进行评估，ASIC的约束条件（集成程度，元件的速度，ASIC的外部端子数等）和所需规格（成本，小型化，性能）。估计每个功能电路所需的门数和外部端子数，保持计算电路的响应速度满足所要求的性能。

### 4.3.1：ASIC 框图

为了说明见表4.3-1的ΣⅢB的ASIC（JL056）各功能电路的门列表和外部端子列表。

|  |
| --- |
| 与cpu的接口 |
| 时钟分频器 |
| PWM监控 |
| 扩展的I/ O |
| 同步串行 |
| 编码器 |
| 输入指令位置校正计数器 |
| 异步串行 |
| 串行编码器，串行编码器脉冲转换 |
| AD处理 |
| 系统控制 |
| 计时器 |
| 中断 |
| EEPROM接口 |
| 再生控制 |
| 报警 |
| PWM控制 |
| MPU单元 |
| 运行中断 |
| APLL 倍频 |
| SRAM |
| 其它（测试，选择器，延迟元件，时钟缓冲等） |
| 电源 |
|  |



### 4.3.2：ASIC功能

JL056内置的个别功能描述和是时序图。这里作为说明书补充，描述各功能的电路的目的和注意事项。如果有必要会画出方框图和时序图。

1）cpu接口

CPU地址信号通过模块锁存，在该模块中还有读写信号，这些控制信号的时序要满足CPU的时序规范。另一方面，主机CPU的数据总线也连接到这个模块，被分配在ASIC中的读/写数据的每个模块。一般的ASIC内部不使用三态总线，因为它被验证是难以操作的。读数据时数据选择电路被用于聚合在每个模块中。

CN10用于多路复用总线。

2）时钟分频

96MHz信号通过专用集成电路（锁相回路）从晶体振荡器（24MHz的在SGDS）倍频生成。此信号作为输入，其他的时钟由除法电路产生。通过选择该模块中设置寄存器的值，可产生不同时钟从CLKOUT输出给周边使用。各种频率的时钟被用作基本时钟，诸如ASIC内部定时器和中断发生电路。

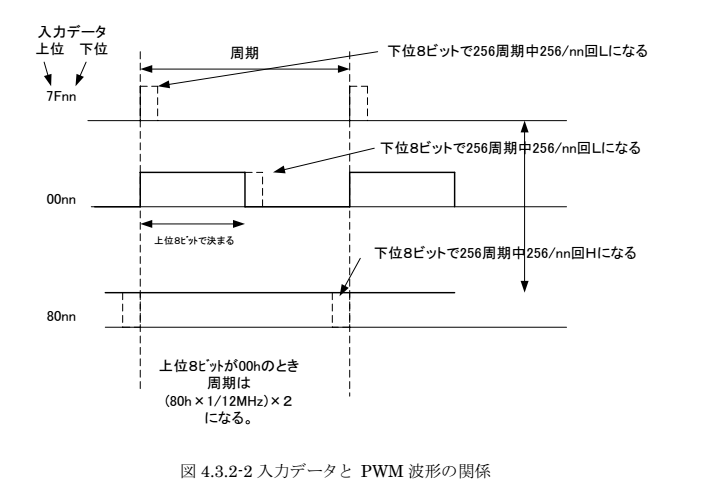
数字伺服控制是在采样控制的基础上，以预定周期的采样时钟得到数据 - 计算 - 进行输出。控制回路中包含电流，速度，位置等环路，某些过程有必要被同步执行。不同步是纹波产生的原因。为了避免这种情况，由时钟分频器产生统一的时间，并以此处理伺服同步问题。

3）模拟监视器用PWM输出

SGDS是提供模拟监视器两个通道。这个模块是一个PWM（脉冲宽度调制）模拟监视生成电路。PWM转换部分在1PCB基板实施，将在4.6硬件这部分加以说明。

模拟转换电路除了PWM方法也有使用电阻阶梯电路的，但其模拟相应的ASIC尚未达到伺服所需的性能。此外，脉宽调制方案可以由脉冲串输出传递到一个简单的滤波器而获得模拟信号，输出电路相对少并且可以有效地利用专用集成电路的外部端子是其两个优点。

此模块包括两部分PWM输出。数据从主机CPU模块的寄存器被转换成模拟集。配置数据为16位长，高8位输入到PWM电路，低8位被提供到DDA（数字微分分析器）电路。8位计数器构成的PWM电路的输出和8位的DDA电路调制的脉冲信号组成了16位精度的PWM脉冲串。在一个时钟周期中，DDA调制方法的输出和从PWM电路产生的脉冲的脉冲宽度一起进行输出。在配置数据为0的时候， PWM输出脉冲是50％的占空比，最高位是符号位。PWM的基本载频为46.875khz，它是一个12MHz的时钟的256分频，DDA调制分量的频率为基本载频的1/256，最低频率分量是最糟糕的183Hz，此频率分量是依赖于配置数据的低8位。并在图4.3.2-2 显示了输入数据和PWM波形之间的关系



两个伺服操作的主从，则可以通过将主伺服输出的转矩监控作为从伺服的转矩指令。在这样的情况下的模拟输出，有必要考虑PWM的频率响应。如主从操作是串联操作多的大型机械，由于惯性大这样的机器就不需要那么高的反应。此外，模拟输出的低频成分，低8位的幅度分量，即1/256相对于满刻度，大的机器上似乎没有效果。然而有的应用程序寻求在同一时间高频率响应和高精确度的未来可能性，作为一个设计师要牢记这是早晚的事

4）扩展IO

SGDS IF01在该基板（1PCB）该功能是未使用。说明省略。

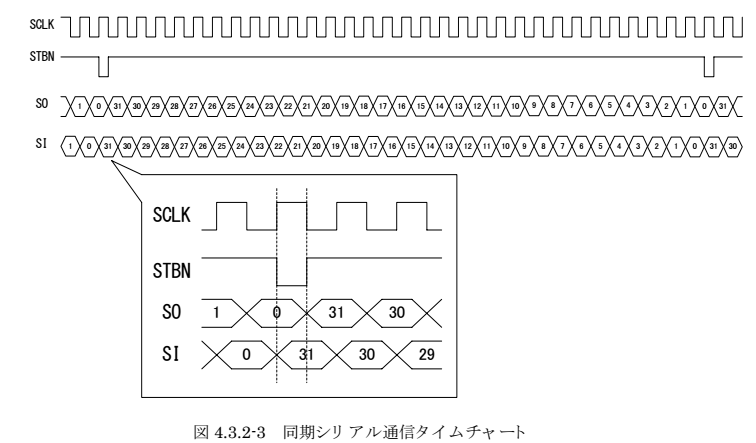
5）同步串行

伺服用于与外部设备交换信息的输入和输出信号。这个模块是一个32位的输入1信道（ASIC外部端子：SI）和三个32位输出通道（SO ASIC外部端子，P00，P01）：执行同步串行通信。（然而，SGDSIF01 SI输入0至16位，SO输出从0到24位）。

输出数据从主机CPU模块的寄存器中设定移入移位寄存器，串联从ASIC的外部端子SO输出。这个信号是安装在4.6.8部分中描述的IF01基板上由串行/并行转换电路被转换成并行信号CN1的时序输出。

从CN1输入的信号以相反的方向通过并行/串行转换电路IF01转换为串行信号，然后通过串行移位寄存器到主机CPU。并且这些移位寄存器中，为了同时控制输入输出服务，转换电路的串行时钟（ASIC外部端子：SCLK）和选通信号（ASIC外部端子：STBL）也该模块中生成的。因为串行时钟和选通信号是常态，动作状态不改变，使得移位的内容在输入移位寄存器和输入寄存器，输出寄存器和输出移位寄存器，都是双缓冲器结构。主机CPU的访问被限制在该电路结构中，必须小心。有关详细信息，请参阅JL056内部手册或JL056用户手册。

动作波形示于图4.3.2-3。

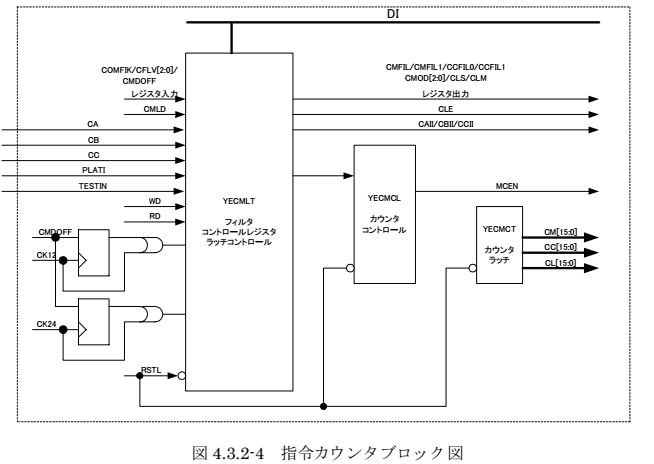


6）异步串行接口

这个模块是执行异步（异步）的串行通信的专用发送模块。以波特率9600将主机CPU写入在内部寄存器的发送数据（固定）输出。开始传输被写入寄存器的数据，在完成传输时就绪标志被设置。分频计的DA脉冲输出和ASIC的输出端是共享这个输出的，如果你想要使用此功能，内部寄存器DINCSET：有必要通过0024设置的第3位来选择输出。

7）指令脉冲计数器

这个模块是由16位计数器和用于计数后段的4.6.4中描述的位置指令输入脉冲及其外围电路。它显示框图在图4.3.2-4中。



指令脉冲信号CA，CB，CC是对通过噪声或颤动吸收滤波器电路输入到脉冲指令计数器。指令计数率最高24MPPS。外围锁存电路来选择上述的命令脉冲的形式。在原点触发的上升沿，原点锁存计数器值被锁存，定时的下降沿或中断信号INT0锁存负载寄存器的值，INT1时主机CPU读取控制寄存器。锁存数据可以从主机CPU读取。如果指令计数器不需要（例如，要减少该ASIC的功率消耗），能够由控制寄存器（003CH）的设置，以停止时钟到这个模块。

指令脉冲的形式是从以下三种选择。

·（代码“0”和“1”）的旋转信息和脉冲串

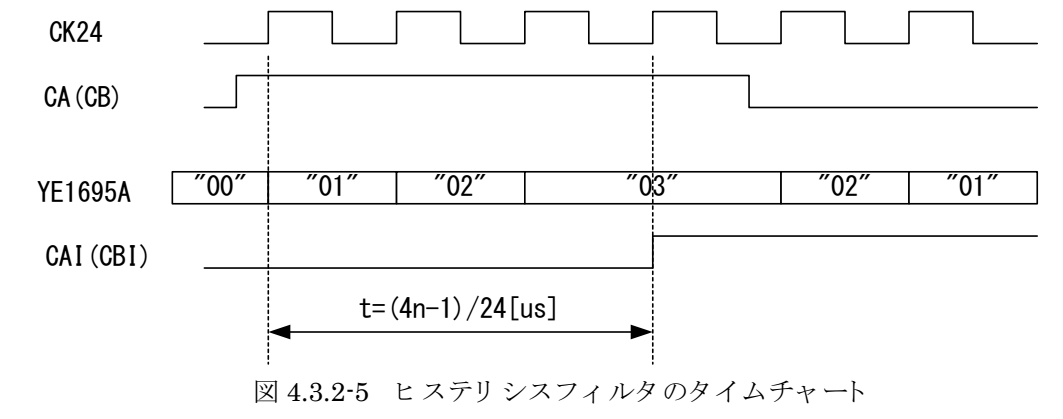
·CW脉冲CCW脉冲

·90度相位差2相脉冲（A相/ B相脉冲）

命令输入滤波电路是由控制寄存器（0022h）设置决定的，24MHz的时钟同步，41ns（24MHz的时钟）的多数过滤器，83ns（2时钟为12MHz）的多数过滤器，直通，可以选择。它可以添加到滞后滤波器后面用于命令输入的CA CB。控制寄存器CMFT（004Ah）[2：0]设置过滤器的阈值，与设定值比较，5位滞后U / D计数器，接受CA（CB）。滞后宽度为t=（4N-1）/24[微秒]。（N是CMFT[2：0]的设定值+ 1）

现在，CMFT[2：0]是“000”，因为n= 1 ，T =（4×1-1）/24=0.125， 125[微秒]的滞后滤波器。

换言之，“00” - >“01” - >“02” - >“03” -> CA（CB）接受，“03” - >“02” - >“01” - >“00” - >的CA（CB）和重复接受的行为。见图4.3.2-5。（CBI）是从滞后滤波器的输出，YE1695A是一个滞后计数器。



8）命令输入修正计数器

由NCT使用。说明省略。

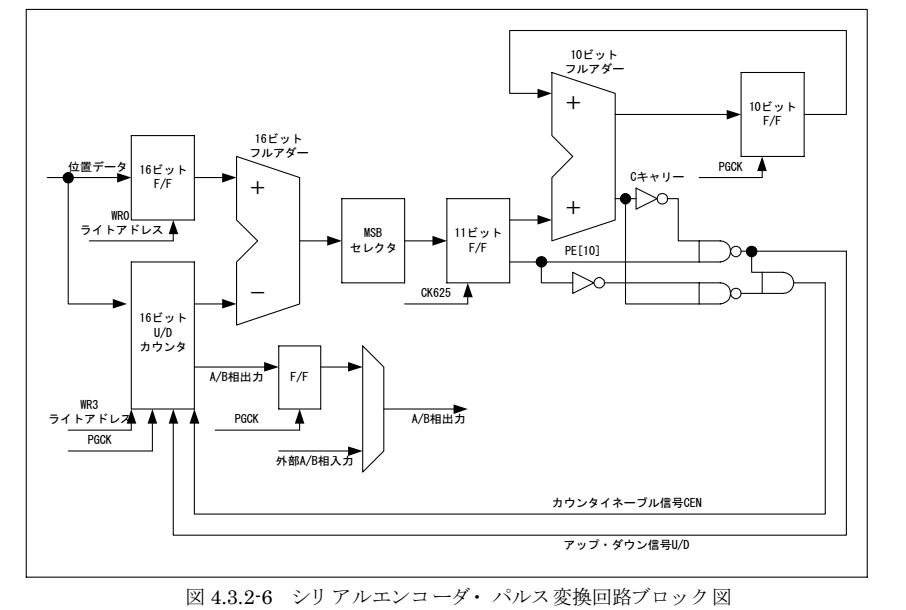
9）串行编码器脉冲转换

此模块将来自串行编码器发送来的位置数据转换成A相B相C相的一个脉冲串并输出， ASIC外部端子DA，DB，DC输出到外部装置。ASIC外部端子DA，DB，DC前有分频计数器插入，这将在下一节进行说明。另外，从ASIC外部端子到外部设备的连接器的驱动电路在4.6.9中描述。模块由以下几部分组成，分别从数据/脉冲转换电路，时钟发生电路，位置数据选择电路，C-相输出电路等四个电路进行说明。

1. 数据/脉冲转换电路

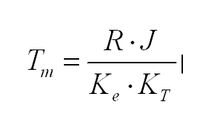
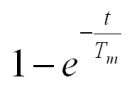
串行编码器的位置信息是每个采样周期（62.5us）得到的二进制数。要使用DDA（数字微分分析仪）电路将数据转换为62.5μs之间的均匀脉冲序列。数据/脉冲转换电路框图在图4.2.3-6中。在该图中，11位的F/F和10位全加器，10位F/F组成的DDA电路。

通过位置数据选择电路所选择的位置数据输入到电路中，所述位置数据和16位的升降计数器的值之间的差，作为10位的DDA电路的输入。该DDA电路的溢出（符号位）的MSB之间运算为“1”时前面的上升下降计数器就上升，，“0”的时候就下降。脉冲A,B相输出如图4.2.3-6所示是从上下计数器的低2位产生的。DDA的循环操作时钟CK625也就是62.5us，写入位置的数据，在62.5us就会输出10位的脉冲，上下计数器被操作。



# 附录A

控制上其计算公式为

[](http://baike.baidu.com/pic/%E6%9C%BA%E7%94%B5%E6%97%B6%E9%97%B4%E5%B8%B8%E6%95%B0/9538762/0/d000baa1cd11728b28f6ee91c8fcc3cec2fd2cad?fr=lemma&ct=single)[](http://baike.baidu.com/pic/%E6%9C%BA%E7%94%B5%E6%97%B6%E9%97%B4%E5%B8%B8%E6%95%B0/9538762/0/8cb1cb134954092397b601cd9258d109b2de49a1?fr=lemma&ct=single)

这两者其实是[等价](http://baike.baidu.com/view/1256077.htm)的。

电机有两个时间常数：机电时间常数Tm和电气时间常数Te。通常Tm>>Te，这种情况下电机的传递函数可看作两个惯性环节的串联，两个惯性环节的时间常数就分别是Tm和Te，而对于一般的应用，由于Te很小，对应的惯性环节可以忽略不计，于是电机的传函就简化为：1/(Tm\*s+1)。对于这样一个惯性环节，其阶越响应为：在阶越发生后Tm时刻，其输出即为0.632。

伺服电机的机械时间常数根据定义：tm =R\*J/Ke\*Kt，即与绕组电阻、转子转动惯量、电机反电势系数、电机力矩系数有关。据说拖动电机的机械时间常数与空载从零速加速到平衡转速的63.2%所需的时间相当。在伺服系统中，该常数可能与系统的速度环阶跃响应时间在数量上相当。伺服电机的电气时间常数一般是指定子绕组的电感与电阻的比值（te＝L/R），与伺服系统的电流阶跃响应时间有关，但未必相当。

|  |
| --- |
|  |

准确地讲，两个常数在定义和概念上只和电机本身的特性有关，加上驱动后的外特性与之相关，但不直接，因此才会有PID参数不同，加速能力不同的现象和问题，这是电机加驱动构成伺服系统后的响应问题，而不是电机本身的特性。

另外，需要注意的是，电机的反电势系数Ke与力矩系数Kt之间的关系，在直流伺服电机中Kt=9.55\*Ke，其中Kt的单位是Nm/A，Ke的单位是V/rpm，当Ke和Kt同为国际单位制时，Ke=Kt。这一点与永磁交流伺服电机中Ke与Kt的关系稍有差别，多数企业的永磁交流伺服电机手册中如果同时给出Ke和Kt，则一般Kt=9.55\*Ke\*1.732，当Ke和Kt同为国际单位制时，Kt与Ke之间差1.732倍（即：根号3倍），原因在于Ke一般会以线反电势的形式给出。有些供应商不舍得提供Ke和Kt参数，好在力矩系数Kt可以根据额定力矩和额定电流导出，导出力矩系数后，就可以根据Kt=9.55\*Ke\*1.732间接导出线反电势系数Ke了，即：Ke=0.1047\*Kt/1.732，单位V/rpm；或者：Ke=104.7\*Kt/1.732，单位V/Krpm，或mV/rpm。