



2023

10. Logique numérique

R2 : Guide SCRAPY

Numéro de projet: **2021-1-FR01-KA220-SCH-000031617**



Le soutien de la Commission européenne à la production de cette publication ne constitue pas une approbation du contenu, qui reflète uniquement les points de vue des auteurs, et la Commission ne peut être tenue responsable de toute utilisation qui pourrait être faite des informations contenues dans ce document.



Co-funded by
the European Union

ECAM EPMI

30/04/2023

Table des matières

1. Introduction	2
2. Logique combinatoire	2
3. Tables de vérité.....	3
4 Logique booléenne écrite	5
5 Logique séquentielle	5
6 éléments de circuit séquentiels.....	6
6.1 Bascule de type D.....	6
6.2 Bascule de type T	6
6.3 Bascule de type JK	7
6.4 Temps d'installation, de maintien et de propagation.....	7
6.5 Métastabilité	8
7. Conclusion	9

1. Introduction

La logique numérique, ou booléenne, est le concept fondamental qui sous-tend tous les systèmes informatiques modernes. En termes simples, c'est le système de règles qui nous permet de prendre des décisions extrêmement compliquées basées sur de simples questions « oui/non ».

Dans cette leçon, vous découvrirez...

Circuits numériques

Les circuits logiques numériques peuvent être divisés en deux sous-catégories : combinatoires et séquentiels. La logique combinatoire change "instantanément"- la sortie du circuit répond dès que l'entrée change (avec un certain retard, bien sûr, car la propagation du signal à travers les éléments du circuit prend un peu de temps). Les circuits séquentiels ont un signal d'horloge et les changements se propagent à travers les étapes du circuit sur les bords de l'horloge.

Généralement, un circuit séquentiel sera constitué de blocs de logique combinatoire séparés par des éléments de mémoire activés par un signal d'horloge.

La programmation

La logique numérique est également importante en programmation. Comprendre la logique numérique rend possible la prise de décision complexe dans les programmes.

Certaines subtilités de la programmation sont importantes à comprendre ; nous y reviendrons une fois que nous aurons couvert les bases.

Avant de commencer, ce serait peut-être une bonne idée de revoir notre leçon sur les nombres binaires, si ce n'est pas déjà fait. Il y a une petite discussion sur la logique booléenne ici, mais nous approfondirons le sujet ici.

Voici quelques autres sujets que vous devriez connaître avant de commencer.

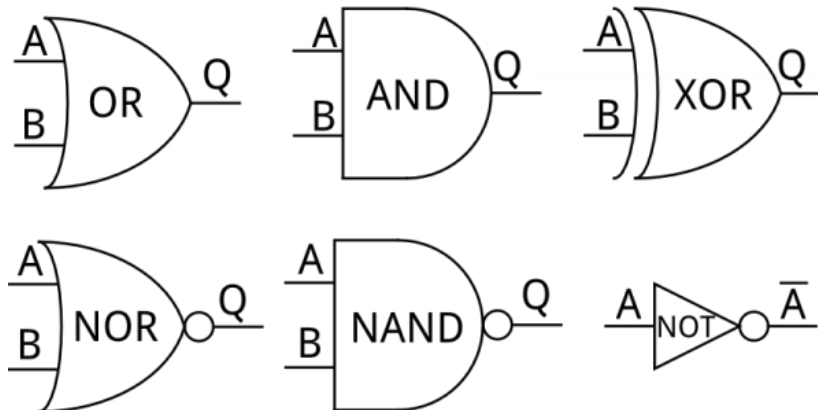
- Qu'est-ce que l'électricité ?
- Binaire
- Analogique ou numérique
- Niveaux logiques

2. Logique combinatoire

Les circuits combinatoires sont constitués de cinq portes logiques de base :

- Porte ET - la sortie est 1 si les DEUX entrées sont 1
- Porte OU - la sortie est 1 si AU MOINS une entrée est 1
- Porte XOR - la sortie est 1 si SEULEMENT une entrée est 1
- Porte NAND - la sortie est 1 si AU MOINS une entrée est 0

- Porte NOR - la sortie est 1 si les DEUX entrées sont 0



Logique combinatoire

Il existe un sixième élément dans la logique numérique, l'inverseur (parfois appelé porte NON). Les onduleurs ne sont pas de véritables portes, car ils ne prennent aucune décision. La sortie d'un onduleur est un 1 si l'entrée est un 0, et vice versa.

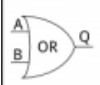
Quelques points à noter concernant l'image ci-dessus :


- Habituellement, le nom de la porte n'est pas imprimé ; le symbole est supposé être suffisant pour l'identification.
- La notation des bornes de type ABQ est standard, bien que les schémas logiques les omettent généralement pour les signaux qui ne sont pas des entrées ou des sorties du système dans son ensemble.
- Deux périphériques d'entrée sont standard, mais vous verrez occasionnellement des périphériques avec plus de deux entrées. Ils n'auront cependant qu'une seule sortie.


Les circuits logiques numériques sont généralement représentés à l'aide de ces six symboles ; les entrées sont à gauche et les sorties à droite. Bien que les entrées puissent être connectées, les sorties ne doivent jamais être connectées, mais uniquement à d'autres entrées. Une sortie peut cependant être connectée à plusieurs entrées.

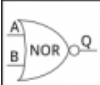
3. Tables de vérité


Les descriptions ci-dessus sont adéquates pour décrire la fonctionnalité de blocs uniques, mais il existe un outil plus utile : la table de vérité. Les tables de vérité sont des tracés simples qui expliquent la sortie d'un circuit en termes d'entrées possibles dans ce circuit. Voici des tables de vérité décrivant les six éléments principaux :


		A	
		0	1
B	0	0	1
	1	1	1

		A	
		0	1
B	0	0	0
	1	0	1

		A	
		0	1
B	0	0	1
	1	1	0

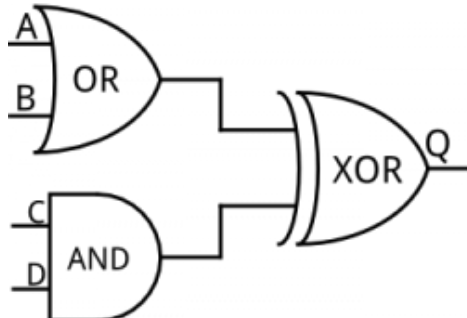
		A	
		0	1
B	0	1	0
	1	0	0

		A	
		0	1
B	0	1	1
	1	1	0

		A	
		0	1
		1	0

Tables de vérité

Les tables de vérité peuvent être étendues à une échelle arbitraire, avec autant d'entrées et de sorties que vous pouvez gérer avant que votre cerveau ne fonde. Voici à quoi ressemblent un circuit à quatre entrées et une table de vérité :

		AB			
		00	01	10	11
CD	00	0	1	1	1
	01	0	1	1	1
	10	0	1	1	1
	11	1	0	0	0

Logique booléenne

4 Logique booléenne écrite

Il est bien entendu utile de pouvoir écrire dans un format mathématique simple une équation représentant une opération logique. À cette fin, il existe des symboles mathématiques pour les opérations uniques : AND, OR, XOR et NOT.

- A ET B doivent être écrits AB (ou parfois $A \cdot B$)
- A OU B doit être écrit sous la forme $A + B$
- A XOR B doit s'écrire $A \oplus B$
- NOT A doit être écrit sous la forme A' ou $\neg A$

Vous remarquerez qu'il manque deux éléments sur cette liste : NAND et NOR. Généralement, ceux-ci sont simplement représentés en complétant la représentation appropriée :

- A NAND B s'écrit $(AB)'$, $(A \cdot B)'$ ou (AB)
- A NOR B s'écrit $(A + B)'$ ou $(A + B)$ Logique Séquentielle

5 Logique séquentielle

La logique combinatoire est excellente, mais sans l'ajout de circuits séquentiels, l'informatique moderne ne serait pas possible.

Les circuits séquentiels sont ce qui ajoute de la mémoire à nos systèmes logiques. Comme mentionné précédemment, la logique combinatoire produit des résultats après un certain temps. Ce délai varie en fonction de nombreux facteurs : le processus de fabrication des pièces impliquées, la température du silicium et la complexité du circuit. Si la sortie d'un circuit dépend des résultats de deux autres circuits combinatoires et que les résultats arrivent à des moments différents (ce qui sera le cas dans le monde réel), un circuit combinatoire « aura un problème » brièvement, produisant un résultat qui peut ne pas être cohérent avec l'opération souhaitée.

Cependant, un circuit séquentiel n'échantillonne et ne propage la sortie qu'à des moments précis. Si l'entrée change entre ces moments, elle est ignorée. Le temps d'échantillonnage est généralement synchronisé sur l'ensemble du circuit et est appelé « horloge ». Lorsqu'on cite la « vitesse » d'un ordinateur, c'est de cette valeur qu'il s'agit. Il est possible de concevoir des circuits séquentiels « asynchrones », qui ne s'appuient pas sur une horloge globale synchronisée. Cependant, ces systèmes posent de grandes difficultés, et nous n'en parlerons pas ici.

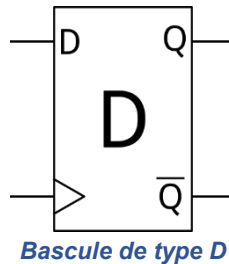
En remarque, toute section de logique numérique aura deux valeurs de retard caractéristiques : le temps de retard minimum et le temps de retard maximum. Si le circuit tombe en panne pendant le temps de retard minimum (c'est-à-dire s'il est plus rapide qu'il ne devrait l'être), le circuit échouera de manière irréparable. Si ce circuit fait partie d'un appareil plus grand, comme un processeur d'ordinateur, l'ensemble de l'appareil est un déchet et ne peut pas être utilisé. Si le temps de retard maximum échoue (c'est-à-dire si le circuit est plus lent qu'il ne devrait l'être), la vitesse d'horloge peut être réduite pour s'adapter au circuit le plus lent du système. Les temps de retard maximum ont tendance

à augmenter à mesure que le silicium formant un circuit se réchauffe, c'est pourquoi les ordinateurs deviennent instables lorsqu'ils surchauffent ou lorsque la vitesse d'horloge augmente (comme c'est le cas avec l'overclocking).

6 éléments de circuit séquentiels

Comme c'est le cas avec la logique combinatoire, il existe plusieurs éléments de base du circuit qui constituent les éléments constitutifs des circuits séquentiels. Ces blocs sont construits à partir des éléments combinatoires de base, en utilisant le feedback de la sortie pour stabiliser l'entrée. Il en existe deux « saveurs » : les loquets et les tongs. Bien que les termes soient fréquemment utilisés de manière interchangeable, les verrous sont moins utiles, car ils ne sont pas cadencés ; nous allons nous concentrer sur les tongs.

6.1 Bascule de type D

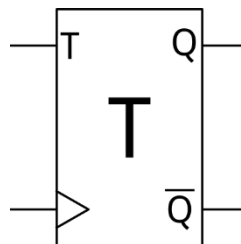


Bascule de type D

Le type de bascule le plus simple est le type D. Les bascules D sont simples : sur un front d'horloge (normalement montant, bien qu'elles puissent être trouvées avec un inverseur intégré pour synchroniser sur le front descendant à la place), l'entrée est verrouillée sur la sortie.

Habituellement, l'entrée d'horloge est désignée par le petit triangle empiétant sur le symbole. La plupart des bascules fournissent deux sorties : la sortie « normale » et la sortie complémentée.

6.2 Bascule de type T

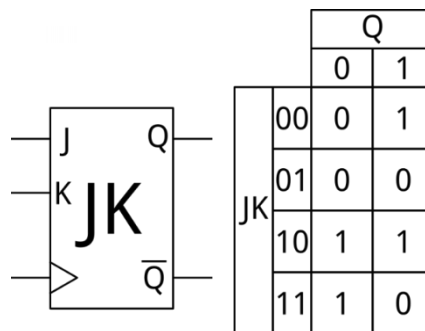


Bascule de type T

Le type T est à peine plus complexe. Le « T » signifie « bascule ». Lorsqu'un front d'horloge se produit, si l'entrée T est à 1, la sortie change d'état. Si l'entrée est un 0, la sortie reste la même. Comme pour le type D, le complément de la sortie est généralement fourni.

Une fonction utile de la bascule T est un circuit de division d'horloge. Si T est maintenu élevé, la sortie sera la fréquence d'horloge divisée par deux. Une chaîne de bascules T peut ainsi être utilisée pour produire des horloges plus lentes à partir de l'horloge mère d'un appareil.

6.3 Bascule de type JK



Bascule de type JK

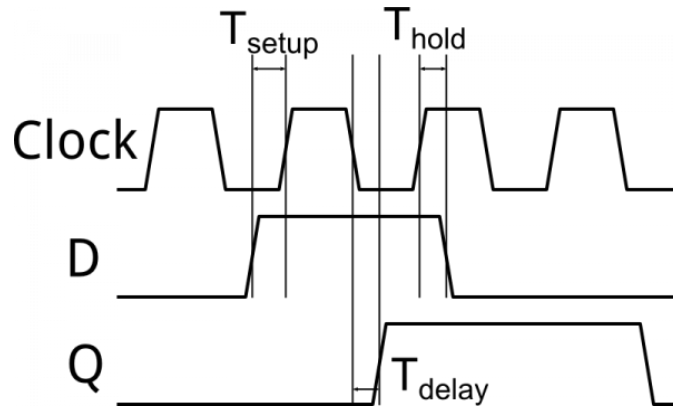
Enfin, nous avons le type JK. Le type JK est le seul des trois qui nécessite véritablement une table de vérité pour être expliqué ; il dispose de deux entrées (J et K) et la sortie peut rester la même, définie, effacée ou basculée, en fonction de la combinaison de signaux d'entrée présents. Bien sûr, comme pour toutes les bascules, l'entrée au moment de l'horloge est la seule chose qui compte.

6.4 Temps d'installation, de maintien et de propagation

Tous les circuits séquentiels ont ce qu'on appelle des temps de « configuration » et de « maintien », ainsi qu'un délai de propagation. Comprendre ces trois éléments est essentiel pour concevoir des circuits séquentiels qui fonctionnent comme prévu.

Le temps de configuration est le temps minimum avant qu'un front d'horloge montant ne se produise, pendant lequel un signal doit arriver à l'entrée d'une bascule pour que la bascule verrouille correctement les données. De même, le temps de maintien est la durée minimale pendant laquelle un signal doit rester stable après l'apparition du front montant de l'horloge avant de pouvoir changer.

Alors que les temps d'établissement et de maintien sont donnés comme valeurs minimales, le délai de propagation est donné comme maximum. En termes simples, le délai de propagation correspond à la plus grande période de temps après un front descendant au niveau de l'horloge avant que vous puissiez vous attendre à voir le signal sur les sorties. Voici un graphique les expliquant :



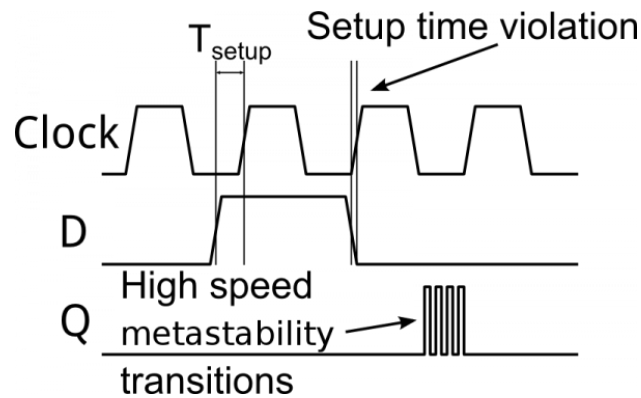
Temps d'installation, de maintien et de propagation

Notez que dans l'image ci-dessus, les transitions sont dessinées comme étant légèrement inclinées. Cela sert à deux fins : cela nous rappelle que les fronts d'horloge et de données ne sont jamais vraiment des angles droits et auront toujours un temps de montée ou de descente non nul, et cela permet de voir plus facilement où les lignes verticales marquant les différentes heures se croisent avec les signaux. .

La combinaison de ces trois valeurs détermine la vitesse d'horloge la plus élevée qu'un appareil peut utiliser. Si le délai de propagation d'une partie plus le temps d'établissement de la partie suivante du circuit dépasse le temps entre le front descendant d'une impulsion d'horloge et le front montant de la suivante, les données ne seront pas stables à l'entrée du deuxième composant. , ce qui l'oblige à se comporter de manière inattendue.

6.5 Métastabilité

Le non-respect des temps de configuration et de maintien peut entraîner un problème appelé « métastabilité ». Lorsqu'un circuit est dans un état métastable, la sortie d'une bascule peut osciller rapidement entre les deux états normaux, souvent à une fréquence bien supérieure à la fréquence d'horloge du circuit.



Métastabilité

Les problèmes de métastabilité peuvent aller d'un fonctionnement intempestif jusqu'à des dommages à la puce, car ils peuvent augmenter la consommation de courant. Bien que la métastabilité se résolve généralement d'elle-même, au moment où elle le fait, le système peut se trouver dans un état inconnu et devoir être complètement réinitialisé pour restaurer un fonctionnement correct.

Les problèmes de métastabilité surviennent souvent lorsqu'un signal traverse des domaines d'horloge, en d'autres termes lorsqu'un signal passe entre des appareils cadencés par différentes sources. Étant donné que les horloges ne sont pas synchronisées (et même si les horloges sont à la même fréquence nominale, la réalité veut qu'elles soient légèrement différentes), un front d'horloge et un front de données seront forcément trop proches pour plus de confort, ce qui entraînera une configuration. violation du temps. Une solution simple à ce problème consiste à exécuter toutes les entrées dans un système via une paire de bascules D en cascade. Même si la première bascule entre en métastabilité, elle se sera (espérons-le) stabilisée avant la prochaine impulsion d'horloge, permettant à la deuxième bascule de lire les données correctes. Cela entraîne un retard d'un cycle dans les fronts de données entrants,

7. Conclusion

Comprendre la logique numérique est une compétence cruciale en électronique. Pour plus d'informations sur le sujet, consultez les sources ci-dessous :

- Digital Logic - Un bon site couvrant la plupart du matériel présenté ici
- Algèbre booléenne - Page Wikipédia sur l'algèbre booléenne, qui est la discipline qui sous-tend ce sujet.
- Méthode Quine-McCluskey - QM est une méthode de simplification des circuits numériques en un ensemble minimum de portes nécessaires, étant donné plusieurs entrées et une carte de sortie souhaitée.
- Blocs logiques et introduction à la logique numérique