

学校代码: 11276

分类号: 填写分类号

密 级: 填写密级

U D C: UDC 编号

学 号: 填写学号



南京工程学院

NANJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

# 硕士专业学位论文

## 电力系统非线性负载仿真分析

学位论文形式: 填写论文形式

研究生姓名: 研究生姓名

导师姓名: 导师姓名

申请学位类别 填写学位类别 学位授予单位 南京工程学院

领域名称 填写领域名称 论文答辩日期 2023 年 12 月 15 日

研究方向 填写研究方向 学位授予日期 2023 年 12 月 20 日

答辩委员会主席 填写答辩主席姓名 评 阅 人 填写评阅人姓名

2023 年 12 月 15 日

南京工程学院  
硕士专业学位论文

电力系统非线性负载仿真分析  
及其模拟发生装置研究

专业名称: 化学化工学院

研究生姓名: L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

导师姓名: NJIT L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 模板

校外导师:

二〇二五年七月

# **Research on Simulation Analysis of Nonlinear Load and Simulation Generating Equipments in Power System**

**A Thesis Submitted to**

**Nanjing Institute of Technology**

**For the professional Degree of Master**

**BY XXX**

Supervised by

Professor XXX

And

Chief Engineer XXX

School of Electric Power Engineering

Nanjing Institute of Technology

January 2025

## 南京工程学院学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京工程学院或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：张三

签字日期：2025年07月15日

## 南京工程学院学位论文使用授权声明

南京工程学院、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权南京工程学院研究生院办理。

**(保留的学位论文在解密后适用本授权说明)**

研究生签名：张三 导师签名：李四 签字日期：2025年07月15日

论文提交日期：二〇二五年七月二十五日

## 摘 要

本文研究了电力系统中非线性负载及仿真发电设备的建模与仿真分析方法。首先，基于...（此处填写摘要内容，300字左右）。针对...问题，提出了...方法。实验结果表明，所提方法能有效...（结论）。本研究对...具有重要意义。

**关键词：**电力系统；非线性负载；仿真建模；谐波分析

## ABSTRACT

This paper investigates the modeling and simulation analysis methods for nonlinear loads and simulation generating equipment in power systems. Firstly, ... (英文摘要内容, 与中文对应). To address ..., a ... method is proposed. Experimental results show that ... (结论). This study is significant for ....

**Keywords:** power system; nonlinear load; simulation modeling; harmonic analysis

## 目录

1	绪言.....	1
1.1	L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X 介绍.....	1
1.2	本模板介绍.....	1
1.2.1	文档类的选取.....	1
1.2.2	参考文献编译方式.....	1
2	图片.....	2
3	绘制普通三线表格.....	3
4	公式.....	7
5	其它小功能.....	9
5.1	脚注.....	9
5.2	无序列表与有序列表.....	9
5.3	字体加粗与斜体.....	9
	参考文献.....	10
	致谢.....	11

# 1 绪言

## 1.1 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 介绍

要使用 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 来完成建模论文，首先要确保正确安装一个 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 的发行版本。

- Mac 下可以使用 MacT<sub>E</sub>X
- Linux 下可以使用 T<sub>E</sub>XLive ；
- windows 下可以使用 T<sub>E</sub>XLive 或者 MikT<sub>E</sub>X ；

具体安装可以参考 [Install-LaTeX-Guide-zh-cn](#) 或者其它靠谱的文章。另外可以安装一个易用的编辑器，例如 T<sub>E</sub>Xstudio 。

## 1.2 本模板介绍

为简化南京工程学院本科生毕业论文排版流程，开发了符合校标的 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 模板。该模板内置最新格式规范，可自动处理页眉页脚、标题样式、参考文献等排版要素，使用者仅需编写内容即可生成标准化文档，有效提升写作效率并确保格式统一性。

使用该模板前，请阅读模板的使用说明文档。下面给出模板使用的大概样式。

### 1.2.1 文档类的选取

模板的文档类是基于 C<sub>T</sub><sub>E</sub>X 宏集中自带的 `ctexart` 文档类来实现的<sup>[2]</sup>，还用到了 一些常用的宏包，编译时要保证自己的系统中已经安装好了这些宏包，如果用户使用的是全量安装的 TeX Live 就没有问题。

### 1.2.2 参考文献编译方式

模板推荐使用 `\bibliography{}` 命令处理参考文献，借助“GB/T 7714—2015 BibTeX Style”<sup>[3]</sup>，模板使用者可以放心大胆地将参考文献的排版工作交给 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X，而无需手动调整每条参考文献的格式。

编译记得使用 `xelatex`，而不是用 `pdflatex`。在命令行编译的可以按如下方式编译：

1

```
xelatex example
```

或者使用 `latexmk` 来编译，更推荐这种方式。

```
1 latexmk -xelatex example
```

下面给出写作与排版上的一些建议<sup>1</sup>。

## 2 图片

论文中不可避免要插入图片。图片可以分为矢量图与位图。位图推荐使用 `jpg`, `png` 这两种格式，避免使用 `bmp` 这类图片，容易出现图片插入失败这样情况的发生。矢量图一般有 `pdf`, `eps`，推荐使用 `pdf` 格式的图片，尽量不要使用 `eps` 图片，理由相同。

注意图片的命名，避免使用中文来命名图片，可以用英文与数字的组合来命名图片。避免使用 1,2,3 这样顺序的图片命名方式。图片多了，自己都不清楚那张图是什么了，命名尽量让它有意义。下面是一个插图的示例代码。

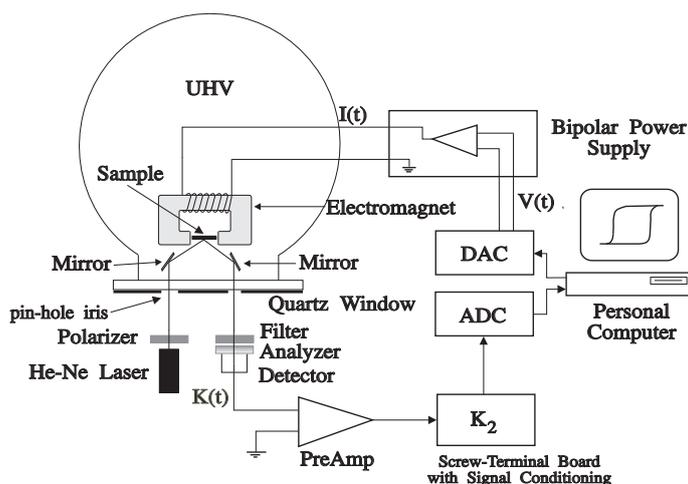


图 2.1 电路图

注意 `figure` 环境是一个浮动体环境，图片的最终位置可能会跑动。`[!h]` 中的 `h` 是 `here` 的意思，`!` 表示忽略一些浮动体的严格规则。另外里面还可以加上 `btm` 选项，它们分别是 `bottom`, `top`, `page` 的意思。只要这几个参数在花括号里面，作用是不分先后顺序的。`page` 在这里表示浮动页。

`\label{fig:circuit-diagram}` 是一个标签，供交叉引用使用的。图片是自动编号的，比起手动编号，它更加高效。`\cref{label}` 由 `cleveref` 宏包提供，比普通的 `\ref{label}` 更加自动化。`label` 要确保唯一，命名方式推荐用图片的命名方式。

<sup>1</sup>部分内容摘自《全国大学生数学建模 `LaTeX`》

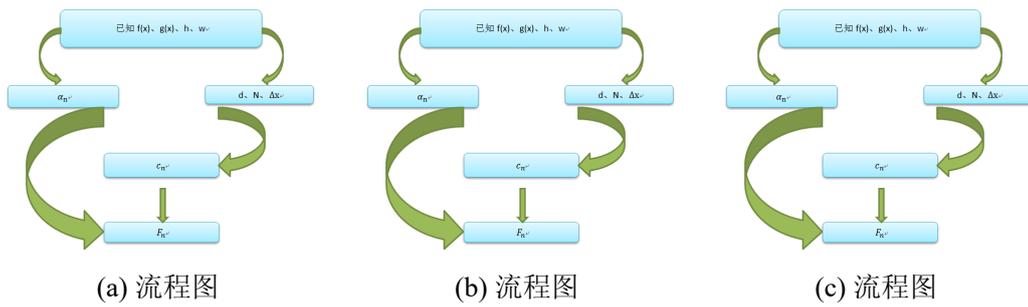


图 2.2 多图并排示例

图片并排的需求解决方式多种多样，下面用 `minipage` 环境来展示一个简单的例子。注意，以下例子用到了 `subcaption` 命令，需要加载 `subcaption` 宏包。

这相当于整体是一张大图片，大图片引用是 `fig. 2.2`，子图引用别分是 `fig. 2.2a`、`fig. 2.2b`、`fig. 2.2c`。

如果原本两张图片的高度不同，但是希望它们缩放后等高的排在同一行，参考这个例子：

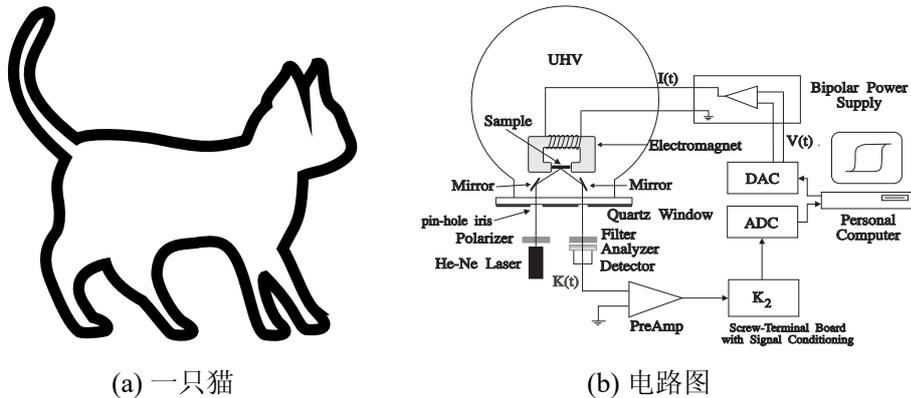


图 2.3 多图并排示例

### 3 绘制普通三线表格

表格应具有三线表格式，因此常用 `booktabs` 宏包，其标准格式如 `table 3.1` 所示。

表 3.1 标准三线表格

$D(\text{in})$	$P_u(\text{lbs})$	$u_u(\text{in})$	$\beta$	$G_f(\text{psi.in})$
5	269.8	0.000674	1.79	0.04089
10	421.0	0.001035	3.59	0.04089
20	640.2	0.001565	7.18	0.04089

其绘制表格的代码及其说明如下。

```

1  \begin{ table }[!htbp]
2  \caption[标签名]{中文标题}
3  \begin{ tabular }{cc ... c}
4  \toprule [1.5 pt]
5  表头第1个格 & 表头第2个格 & ... & 表头第n个格 \\
6  \midrule [1 pt]
7  表中数据(1,1) & 表中数据(1,2) & ... & 表中数据(1,n) \\
8  表中数据(2,1) & 表中数据(2,2) & ... & 表中数据(2,n) \\
9  ..... \\
10 表中数据(m,1) & 表中数据(m,2) & ... & 表中数据(m,n) \\
11 \bottomrule [1.5 pt]
12 \end{ tabular }
13 \end{ table }

```

`table` 环境是一个将表格嵌入文本的浮动环境。`tabular` 环境的必选参数由每列对应一个格式字符所组成：`c` 表示居中，`l` 表示左对齐，`r` 表示右对齐，其总个数应与表的列数相同。此外，`@{文本}` 可以出现在任意两个上述的列格式之间，其中的文本将被插入每一行的同一位置。表格的各行以 `\\` 分隔，同一行的各列则以 `&` 分隔。`\toprule`、`\midrule` 和 `\bottomrule` 三个命令是由 `booktabs` 宏包提供的，其中 `\toprule` 和 `\bottomrule` 分别用来绘制表格的第一条（表格最顶部）和第三条（表格最底部）水平线，`\midrule` 用来绘制第二条（表头之下）水平线，且第一条和第三条水平线的线宽为 1.5pt，第二条水平线的线宽为 1pt。引用方法与图片的相同。

这里笔者给出常见用法，以供参考。

表 3.2 符号说明

符号	内容说明
$\epsilon_{\text{tol}}$	算法误差容限
$\mathbf{a}_{\odot}^{\text{tidal}}$	太阳引潮力项，按二阶梯度展开计算
$E$	偏近点角，通过牛顿迭代法求解开普勒方程
$\hat{\mathbf{P}}, \hat{\mathbf{Q}}$	轨道面正交基向量，由 $(\Omega, \omega, i)$ 计算
$\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \dots, \mathbf{k}_{13}$	算法中间系数，对应 13 次函数估值
$B_{\text{eff}}$	有效摄动阶数

表 3.3 2028 Olympic Medal Predictions (Top 14 Countries by Total Score)

Country	Gold	Silver	Bronze	Total Score
United States	40.0 (38.0–46.3)	40.4 (38.4–44.0)	33.9 (32.2–42.0)	112.0
China	36.7 (34.9–40.0)	27.0 (25.6–30.4)	24.0 (22.8–31.5)	90.8
Great Britain	17.1 (16.2–30.7)	22.8 (21.7–28.5)	26.6 (25.3–30.5)	67.3
Russia	14.3 (13.6–23.6)	18.1 (17.2–20.9)	20.9 (19.9–20.1)	55.7
France	12.1 (11.5–25.3)	13.3 (12.6–26.0)	21.2 (20.1–22.0)	47.0
Australia	12.1 (11.5–22.6)	14.4 (13.7–19.4)	16.2 (15.4–16.5)	46.7
Japan	13.1 (12.4–20.5)	14.9 (14.2–19.0)	15.3 (14.5–17.0)	45.0
Italy	12.1 (11.5–16.4)	13.0 (12.3–13.6)	17.4 (16.5–20.8)	40.2
Germany	12.1 (11.5–19.8)	12.8 (12.2–18.7)	13.4 (12.7–16.4)	33.2
Netherlands	7.1 (6.7–15.0)	8.0 (7.6–11.4)	12.8 (12.2–16.3)	30.8
South Korea	7.7 (7.3–13.0)	7.9 (7.5–9.5)	9.8 (9.3–10.9)	29.0
New Zealand	4.5 (4.3–10.0)	5.9 (5.6–9.7)	5.8 (5.5–10.3)	20.1
Brazil	4.8 (4.6–11.1)	6.1 (5.8–9.1)	7.4 (7.0–11.3)	20.0
Canada	5.4 (5.1–10.2)	5.6 (5.3–7.3)	8.2 (7.8–11.0)	19.2

*Note: Values are formatted as "median (confidence interval)". Countries are ranked by total score median.*

---

**Algorithm 1** 预测误差与观测时间算法

---

**Require:**

初始轨道参数  $\mathbf{X}_0 \in \mathbb{R}^6$  (含误差协方差  $\mathbf{P}_0$ )  
 摄动力模型  $\mathcal{M}$  (含 J2 至 J6 项、日月摄动、太阳光压等)

**Ensure:**

位置误差统计量  $\mu_\epsilon, \sigma_\epsilon \in \mathbb{R}^3$

- 1: **procedure** 误差传播分析 ( $\mathbf{X}_0, \mathbf{P}_0, T_{max}$ )
- 2:     **步骤 1:** 建立参考轨道
- 3:     生成精密星历轨迹:  $\mathbf{X}_{ref}(t) \leftarrow \text{SPICE\_ephem}(t), t \in [0, T_{max}]$
- 4:     构造变分方程:  $\frac{d}{dt}\Phi(t, 0) = \mathbf{A}(t)\Phi(t, 0)$
- 5:     **步骤 2:** 参数扰动采样
- 6:     分解协方差矩阵:  $\mathbf{P}_0 = \mathbf{L}\mathbf{L}^\top$
- 7:     **for**  $k = 1$  **to**  $N_{MC}$  **do**
- 8:         生成随机扰动:  $\delta\mathbf{X}_k \leftarrow \mathbf{L}\mathbf{z}_k, \mathbf{z}_k \sim \mathcal{N}(0, 1)$
- 9:         样本轨道参数:  $\mathbf{X}_k^{(0)} \leftarrow \mathbf{X}_0 + \delta\mathbf{X}_k$
- 10:     **end for**
- 11:     **步骤 3:** 轨道传播计算
- 12:     **for**  $k = 1$  **to**  $N_{MC}$  **并行执行 do**
- 13:         数值积分轨道:  $\mathbf{X}_k(t) \leftarrow \text{RK78}(\mathbf{X}_k^{(0)}, \mathcal{M}, T_{max})$
- 14:         记录位置偏差:  $\Delta\mathbf{r}_k(t) \leftarrow \mathbf{r}_k(t) - \mathbf{r}_{ref}(t)$
- 15:     **end for**
- 16:     **步骤 4:** 统计误差分布
- 17:     计算时刻  $t_j$  的统计量:

$$\mu_\epsilon(t_j) = \frac{1}{N_{MC}} \sum_{k=1}^{N_{MC}} \Delta\mathbf{r}_k(t_j)$$

$$\sigma_\epsilon^2(t_j) = \frac{1}{N_{MC} - 1} \sum_{k=1}^{N_{MC}} \|\Delta\mathbf{r}_k(t_j) - \mu_\epsilon\|^2$$

- 18:     **return**  $\{\mu_\epsilon(t_j), \sigma_\epsilon(t_j)\}_{j=1}^M$
  - 19: **end procedure**
-

表 3.4 Non-awarded Country

BIZ	MAL	OMA	PLE	ESA	UNK	CAM	RWA
VNM	KIR	SOL	SWZ	MAW	HON	GEQ	BOL
STP	CGO	LBN	MDV	GAM	TUV	NRU	ANG
MHL	LES	YEM	SLE	VIN	LAO	CAF	MAD
MLI	SAA	BEN	ARU	GBS	AND	NBO	CRT
COK	FSM	LBR	GUI	SAM	VAN	MLT	LBA
SOM	NFL	ASA	SKN	LIE	BRU	COD	CAY
ROT	COM	NEP	SSD	CHA	MYA	GUM	TLS
BHU	BIH	IVB	YMD	PLW	YAR	BAN	SEY
MTN	ANT	PNG	NCA	RHO			

## 4 公式

数学论文必然涉及不少数学公式的使用。下面简单介绍一个可能用得上的数学环境。

首先是行内公式，例如  $\theta$  是角度。行内公式使用  $\$ \$$  包裹。

行间公式不需要编号的可以使用  $\backslash [ \backslash ]$  包裹，例如

$$E = mc^2$$

其中  $E$  是能量， $m$  是质量， $c$  是光速。

如果希望某个公式带编号，并且在后文中引用可以参考下面的写法：

$$E = mc^2 \tag{4.1}$$

式 eq. (4.1) 是质能方程。

多行公式有时候希望能够在特定的位置对齐，以下是其中一种处理方法。

$$P = UI \tag{4.2}$$

$$= I^2 R \tag{4.3}$$

& 是对齐的位置，& 可以有多个，但是每行的个数要相同。  
矩阵的输入也不难。

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nn} \end{pmatrix}$$

分段函数这些可以用 case 环境，但是它要放在数学环境里面。

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x \text{ 为无理数,} \\ 1 & x \text{ 为有理数.} \end{cases}$$

在数学环境里面，字体用的是数学字体，一般与正文字体不同。假如要公式里面有个别文字，则需要把这部分放在 text 环境里面，即 `\text{文本环境}`。

公式中个别需要加粗的字母可以用 `\mathbf{math symbol}`。如  $\alpha\alpha\alpha$ 。

以上仅简单介绍了基础的使用，对于更复杂的需求，可以阅读相关的宏包手册，如 `amsmath`。复杂的公式也不难打出。

$$P(y | X, \beta, \sigma^2)P(\beta)P(\sigma^2) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(y_i - x_i\beta)^2}{2\sigma^2}\right) \times \mathcal{N}(\beta | 0, \tau^2) \quad (4.4)$$

$$\times \text{Inverse-Gamma}(\sigma^2 | a, b)$$

$$\mathbf{r}_{\odot}(t) = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0(t - t_0) + \frac{1}{2}\mathbf{a}_0(t - t_0)^2 + \frac{1}{6}\mathbf{j}_0(t - t_0)^3 \quad (4.5)$$

$$+ \int_{t_0}^t \int_{t_0}^{\tau} \left[ \sum_{k=1}^4 \mathbf{a}_k(\tau') + \mathcal{O}(c^{-4}) \right] d\tau' d\tau \quad (\text{日心惯性系}) \quad (4.6)$$

$$\mathbf{r}_{\oplus}(t) = [\mathbf{r}_{\odot}(t) - \mathbf{R}_{\odot}^{\oplus}(t)] \cdot \mathbf{R}_{prec}(t) + \Delta\mathbf{r}_{nut}(t) \quad (\text{地心惯性系}) \quad (4.7)$$

希腊字母这些如果不熟悉，可以去查找符号文件 `symbols-a4.pdf`，也可以去 de-

texify 网站手写识别。另外还有数学公式识别软件 mathpix 。

出于工作量,本模板未定义 **definition**、**theorem**、**lemma**、**corollary**、**assumption**、**conjecture**、**axiom**、**principle**、**problem**、**example**、**proof**、**solution** 等环境,需要者可以自行添加。

## 5 其它小功能

### 5.1 脚注

利用 `\footnote{具体内容}` 可以生成脚注<sup>2</sup>。

### 5.2 无序列表与有序列表

无序列表是这样的:

- one
- two
- ...

有序列表是这样子的:

1. one
2. two
3. ...

### 5.3 字体加粗与斜体

如果想强调部分内容,可以使用加粗的手段来实现。加粗字体可以用 `\textbf{加粗}` 来实现。例如: **这是加粗的字体。This is bold fonts**。

中文字体没有斜体设计,但是英文字体有。斜体 *Italics*。

---

<sup>2</sup>脚注可以补充说明一些东西

## 参考文献

- [1] Tobias O, Hubert P, Irene H, et al. The Not So Short Introduction to LaTeX2e[EB/OL]. 2021[2021-06-05]. <http://tug.ctan.org/info/lshort/english/lshort.pdf>.
- [2] CTeX-org. CTEX 宏集手册[EB/OL]. (2021-03-14)[2021-06-05]. <http://mirrors.ctan.org/language/chinese/ctex/ctex.pdf>.
- [3] CTeX-org. CTeX-org/gbt7714-bibtex-style[CP/OL]. (2021-05-08)[2021-06-05]. <https://github.com/CTeX-org/gbt7714-bibtex-style>.

## 致 谢

感钟山紫气之氤氲，润我学术根苗；  
谢天印湖波之澄澈，涤我思辨尘埃。  
感匠石运斤之精微，铸我工程筋骨；  
谢杏坛弦歌之绵长，启我智慧枢机。  
  
谢春风化雨之无声，沐我三载寒窗；  
感星斗列张之有迹，引我万里云程。  
谢同窗砥砺如金石，切磋以成利器；  
感师道巍峨若方山，仰止而见峥嵘。

——乙巳年季夏于天印湖

## 附 录

附录的具体内容（中文采用楷体小四号，英文采用 Times New Roman 小四，首行缩进 2 字符，1.5 倍行距）

表 5.1 宏包罗列

模板中已经加载的宏包				
amsbsy	amsfonts	amsgen	amsmath	amsopn
amssymb	amstext	appendix	array	atbegshi
atveryend	auxhook	bigdelim	bigintcalc	bigstrut
bitset	bm	booktabs	calc	caption
caption3	CJKfntef	cprotect	ctex	ctexhook
ctexpatch	enumitem	etexcmds	etoolbox	everysel
expl3	fix-cm	fontenc	fontspec	fontspec-xetex
geometry	getttitlestring	graphics	graphicx	hobsub
hobsub-generic	hobsub-hyperref	hopatch	hxetex	hycolor
hyperref	ifluatex	ifpdf	ifthen	ifvtex
ifxetex	indentfirst	infwarrerr	intcalc	keyval
kvdefinekeys	kvoptions	kvsetkeys	l3keys2e	letltxmacro
listings	longtable	lstmisc	ltxcaption	ltxcmds
multirow	nameref	pdfescape	pdftexcmds	refcount
rerunfilecheck	stringenc	suffix	titletoc	tocloft
trig	ulem	uniquecounter	url	xcolor
xcolor-patch	xeCJK	xeCJKfntef	xeCJK-listings	xparse
xtemplate	zhnumber			

以上宏包都已经加载过了，不要重复加载它们。