

清 华 大 学

钱学森力学班 2020 级开 放创新挑战研究 (ORIC) 结题报告

题目：面向高速飞行无人系统的仿真
与部署平台

院 系：行健书院

专 业：理论与应用力学（钱学森力学班）

姓 名：于舒昂

指导教师：汪 玉 教授

2023 年 6 月 23 日

关于 ORIC 结题报告使用授权的说明

钱学森力学班有权保留 ORIC 项目书面报告的复印件，允许该报告用于钱学森力学班教学目的的查阅和借阅。钱学森力学班需取得报告撰写者同意及书面授权，方可公布该报告的全部或部分内容。钱学森力学班可以采用影印、缩印、制作电子文档等其他复制手段保存该报告。

签 名：_____ 日 期：_____

中文摘要

四旋翼飞行器具有敏捷的动力学特性，可以在复杂的环境中高速飞行，具有广泛的研究价值和应用价值。但由于其动力学的非线性和未知环境的复杂性，其自主导航是一项具有挑战性的任务，迄今为止只有训练有素的人类飞行员才能发挥其极限性能。本研究提出了一种基于强化学习端到端的方法，使四旋翼飞行器仅用机载传感和计算设备便能自主通过未知的环境。为解决观测空间大、无人机动力学非线性和环境复杂带来的探索空间大，算法难以收敛等问题，本研究提出了先使用特权信息预训练再

关键词： 自主无人系统导航；运动和路径规划；强化学习

ABSTRACT

An abstract of a dissertation is a summary and extraction of research work and contributions. Included in an abstract should be description of research topic and research objective, brief introduction to methodology and research process, and summary of conclusion and contributions of the research. An abstract should be characterized by independence and clarity and carry identical information with the dissertation. It should be such that the general idea and major contributions of the dissertation are conveyed without reading the dissertation.

An abstract should be concise and to the point. It is a misunderstanding to make an abstract an outline of the dissertation and words “the first chapter”, “the second chapter” and the like should be avoided in the abstract.

Keywords are terms used in a dissertation for indexing, reflecting core information of the dissertation. An abstract may contain a maximum of 5 keywords, with semi-colons used in between to separate one another.

Keywords: Autonomous vehicle navigation; Motion and path planning; Reinforcement learning

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 四旋翼无人机发展背景	1
1.1.2 强化学习发展背景	2
1.2 相关工作	2
1.3 研究目的	2
1.4 各章节概述	2
第 2 章 图表示例	4
2.1 插图	4
2.2 表格	4
2.3 算法	6
第 3 章 数学符号和公式	8
3.1 数学符号	8
3.2 数学公式	9
3.3 数学定理	9
第 4 章 引用文献的标注	10
4.1 顺序编码制	10
4.2 著者-出版年制	10
插图索引	11
表格索引	12
参考文献	13
致 谢	16
声 明	17

第 1 章 引言

对大部分的无人系统而言，为了让其能够自主完成任务，任务通常被分解为感知、决策、控制三个子任务，并要求在任务过程中有稳定的定位和通信。四旋翼飞行器是一种具有敏捷动作能力的飞行器，考虑到实际应用场景，飞行器往往需要具备自主感知和决策的能力以摆脱对外部定位、通信和操纵的依赖。在这种情况下四旋翼飞行器的自主导航是极具挑战性的系统问题。本研究借助强化学习这一交互式学习的人工智能算法，提出了一种三段式训练技术以解决复杂环境下四旋翼飞行器的自主导航问题，提升算法收敛速度，提高算法泛化性和飞行稳定性。同时本研究还针对算法训练和实机部署的需求开发了一整套仿真、部署平台。

下面将详细介绍研究背景，提出三个该领域现存的主要挑战并引出研究内容。最后介绍本研究报告各章节的构成。

1.1 研究背景

1.1.1 四旋翼无人机发展背景

四旋翼飞行器 (quadrotor aircraft) 是用四个旋翼产生升力的多轴飞行器，是直升机的一种。随着惯性测量单元 (Inertial measurement unit, IMU)、飞行控制器 (Flight control unit, FCU) 和电子调速器 (Electronic speed control, ESC) 等电子器件的出现，四旋翼飞行器开始使用电传操纵系统控制，并逐渐发展为一种结构简单使用方便的飞行平台。四旋翼飞行器是迄今为止最为灵活、敏捷的无人飞行器之一^{[1][2]}。得益于其敏捷的动力学特性，它们可以穿越复杂地形到达人类和大型机械无法到达的地方。四旋翼飞行器已经在搜索救援、物流、基础设施、娱乐、农业甚至军事领域得到了广泛的应用。例如，美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 在具备自主行动的无人机 (集群) 方向就先后设立了面向 GPS 拒止环境下的快速轻量级自主无人机 (FLA)、面向未来复杂城市环境作战的进攻型机器人集群战术系统 (OFFSET)、人机分层协作作战体系 (ACE) 等项目^[3]。

相较于其它无人系统，四旋翼飞行器在执行自主任务时具有以下三个显著特点：

1. 载荷资源受限。四旋翼飞行器作为一种空中无人平台，在任务目标和续航时间确定的情况下，其载荷资源受严格限制。飞行器所搭载的传感、计算、通

信设备受载荷限制影响，其提供的感知、通信质量往往比其他无人系统更低。

2. 计算资源受限。在载荷首先的前提下，机载计算机的规模严格受限，同时考虑到功率的限制，机载计算机的计算能力往往远低于同一时代的消费级计算机。
3. 动力学高度复杂。相较于无人车和其它飞行器，四旋翼无人机的动力学高度复杂且非线性。同时由于其飞行特性，四旋翼无人机对决策、控制的稳定性和连续性都有较高要求。

在上述情况下，自主导航任务对算法提出了更高要求，感知算法需要对传感器噪声、运动带来的模糊和不断变化的环境具有鲁棒性，而决策和控制算法需要在包含噪声的感知结果下利用有限的计算资源做出稳定而有效的规划。现有较成熟的方法可大致分为两类：基于优化的方法和基于学习的方法，详细的介绍将在章节1.2中展开。

1.1.2 强化学习发展背景

强化学习 (Reinforcement learning, RL) 是机器学习的一个分支。其工作流程是智能体 (Agent) 在与环境 (Environment) 交互的过程中不断获得奖励 (Reward)，通过试错的方式学习到最优策略 (Policy)。其工作原理如图1.1所示。深度学习 (Deep learning, DL) 具有学习特征表示的梯度信息，而强化学习算法可以利用环境信息产生梯度并学习最佳策略。二者结合的方法被称为深度强化学习，已在各个领域取得了很多成就。例如 2016 年谷歌开发的 AlphaGo 在围棋人机大赛中战胜世界冠军李世石，标志着人工智能又一里程碑式的胜利。而后该团队推陈出新，提出了 AlphaZero，在 StarCraft II

1.2 相关工作

1.3 研究目的

1.4 各章节概述

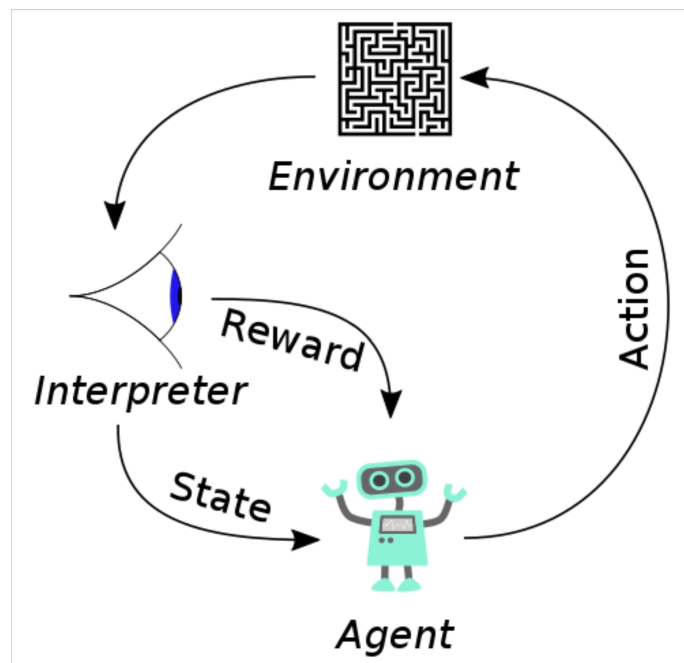
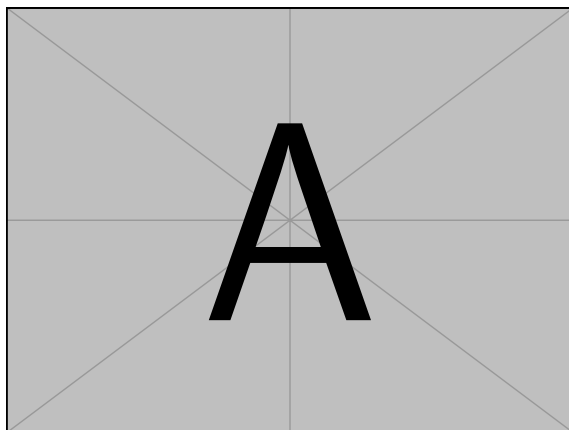


图 1.1 强化学习工作原理

第 2 章 图表示例

2.1 插图

图片通常在 **figure** 环境中使用 `\includegraphics` 插入，如图 2.1 的源代码。建议矢量图片使用 **PDF** 格式，比如数据可视化的绘图；照片应使用 **JPG** 格式；其他的栅格图应使用无损的 **PNG** 格式。注意，**LaTeX** 不支持 **TIFF** 格式；**EPS** 格式已经过时。



国外的期刊习惯将图表的标题和说明文字写成一段，需要改写为标题只含图表的名称，其他说明文字以注释方式写在图表下方，或者写在正文中。

图 2.1 示例图片标题

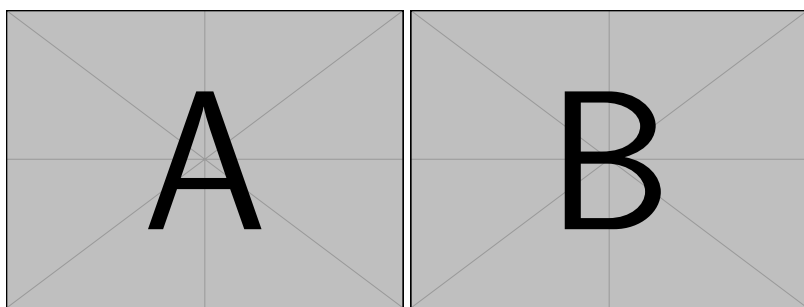
若图或表中有附注，采用英文小写字母顺序编号，附注写在图或表的下方。国外的期刊习惯将图表的标题和说明文字写成一段，需要改写为标题只含图表的名称，其他说明文字以注释方式写在图表下方，或者写在正文中。

如果一个图由两个或两个以上分图组成时，各分图分别以 (a)、(b)、(c)..... 作为图序，并须有分图题。推荐使用 **subcaption** 宏包来处理，比如图 2.2(a) 和图 2.2(b)。

2.2 表格

表应具有自明性。为使表格简洁易读，尽可能采用三线表，如表 2.1。三条线可以使用 **booktabs** 宏包提供的命令生成。

表格如果有附注，尤其是需要在表格中进行标注时，可以使用 **threeparttable** 宏包。研究生要求使用英文小写字母 a、b、c……顺序编号，本科生使用圈码①、



(a) 分图 A

(b) 分图 B

图 2.2 多个分图的示例

表 2.1 三线表示例

文件名	描述
thuthesis.dtx	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件

②、③……编号。

表 2.2 带附注的表格示例

文件名	描述
thuthesis.dtx ^a	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls ^b	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件

^a 可以通过 `xelatex` 编译生成模板的使用说明文档；使用 `xetex` 编译 `thuthesis.ins` 时则会从 `.dtx` 中去除掉文档和注释，得到精简的 `.cls` 文件。

^b 更新模板时，一定要记得编译生成 `.cls` 文件，否则编译论文时载入的依然是旧版的模板。

如某个表需要转页接排，可以使用 `longtable` 宏包，需要在随后的各页上重复表的编号。编号后跟表题（可省略）和“（续）”，置于表上方。续表均应重复表头。

表 2.3 跨页长表格的表题

表头 1	表头 2	表头 3	表头 4
Row 1			

续表 2.3 跨页长表格的表题

表头 1	表头 2	表头 3	表头 4
Row 2			
Row 3			
Row 4			
Row 5			
Row 6			
Row 7			
Row 8			
Row 9			
Row 10			

2.3 算法

算法环境可以使用 `algorithms` 或者 `algorithm2e` 宏包。

算法 2.1 Calculate $y = x^n$

输入: $n \geq 0$

输出: $y = x^n$

$y \leftarrow 1$

$X \leftarrow x$

$N \leftarrow n$

while $N \neq 0$ **do**

if N is even **then**

$X \leftarrow X \times X$

$N \leftarrow N/2$

else { N is odd }

$y \leftarrow y \times X$

$N \leftarrow N - 1$

end if

end while

第3章 数学符号和公式

3.1 数学符号

中文论文的数学符号默认遵循 GB/T 3102.11—1993《物理科学和技术中使用的数学符号》^①。该标准参照采纳 ISO 31-11:1992^②，但是与 T_EX 默认的美国数学会 (AMS) 的符号习惯有所区别。具体地来说主要有以下差异：

1. 大写希腊字母默认为斜体，如

$$\Gamma \Delta \Theta \Lambda \Xi \Pi \Sigma \Upsilon \Phi \Psi \Omega.$$

注意有限增量符号 Δ 固定使用正体，模板提供了 `\increment` 命令。

2. 小于等于号和大于等于号使用倾斜的字形 \leq 、 \geq 。
3. 积分号使用正体，比如 \int 、 \oint 。
4. 偏微分符号 ∂ 使用正体。
5. 省略号 `\dots` 按照中文的习惯固定居中，比如

$$1, 2, \dots, n \quad 1 + 2 + \dots + n.$$

6. 实部 **Re** 和虚部 **Im** 的字体使用罗马体。

以上数学符号样式的差异可以在模板中统一设置。另外国标还有一些与 AMS 不同的符号使用习惯，需要用户在写作时进行处理：

1. 数学常数和特殊函数名用正体，如

$$\pi = 3.14 \dots; \quad i^2 = -1; \quad e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n.$$

2. 微分号使用正体，比如 dy/dx 。
3. 向量、矩阵和张量用粗斜体 (`\symbf`)，如 \mathbf{x} 、 $\mathbf{\Sigma}$ 、 \mathbf{T} 。
4. 自然对数用 $\ln x$ 不用 $\log x$ 。

英文论文的数学符号使用 T_EX 默认的样式。如果有必要，也可以通过设置 `math-style` 选择数学符号样式。

关于量和单位推荐使用 `siunitx` 宏包，可以方便地处理希腊字母以及数字与单位之间的空白，比如： $6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ， $9 \mu\text{m}$ ， kg m s^{-1} ， $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ 。

^① 原 GB 3102.11—1993，自 2017 年 3 月 23 日起，该标准转为推荐性标准。

^② 目前已更新为 ISO 80000-2:2019。

3.2 数学公式

数学公式可以使用 `equation` 和 `equation*` 环境。注意数学公式的引用应前后带括号，通常使用 `\eqref` 命令，比如式 (3.1)。

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f = \sum_{k=1}^m n(\gamma; a_k) \mathcal{R}(f; a_k). \quad (3.1)$$

多行公式尽可能在 “=” 处对齐，推荐使用 `align` 环境。

$$a = b + c + d + e \quad (3.2)$$

$$= f + g \quad (3.3)$$

3.3 数学定理

定理环境的格式可以使用 `amsthm` 或者 `ntheorem` 宏包配置。用户在导言区载入这两者之一后，模板会自动配置 `thoerem`、`proof` 等环境。

定理 3.1 (Lindeberg–Lévy 中心极限定理): 设随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 独立同分布，且具有期望 μ 和有限的方差 $\sigma^2 \neq 0$ ，记 $\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ，则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{\sqrt{n}(\bar{X}_n - \mu)}{\sigma} \leq z\right) = \Phi(z), \quad (3.4)$$

其中 $\Phi(z)$ 是标准正态分布的分布函数。

证明 Trivial. ■

同时模板还提供了 `assumption`、`definition`、`proposition`、`lemma`、`theorem`、`axiom`、`corollary`、`exercise`、`example`、`remar`、`problem`、`conjecture` 这些相关的环境。

第 4 章 引用文献的标注

模板支持 BibTeX 和 BibLaTeX 两种方式处理参考文献。下文主要介绍 BibTeX 配合 natbib 宏包的主要使用方法。

4.1 顺序编码制

在顺序编码制下，默认的 \cite 命令同 \citep 一样，序号置于方括号中，引文页码会放在括号外。统一处引用的连续序号会自动用短横线连接。

\cite{zhangkun1994}	⇒ [3]
\citet{zhangkun1994}	⇒ 张昆 等 ^[3]
\citep{zhangkun1994}	⇒ [3]
\cite[42]{zhangkun1994}	⇒ [3] ⁴²
\cite{zhangkun1994, zhukezhen1973}	⇒ [3-4]

也可以取消上标格式，将数字序号作为文字的一部分。建议全文统一使用相同的格式。

\cite{zhangkun1994}	⇒ [3]
\citet{zhangkun1994}	⇒ 张昆 等 [3]
\citep{zhangkun1994}	⇒ [3]
\cite[42]{zhangkun1994}	⇒ [3] ⁴²
\cite{zhangkun1994, zhukezhen1973}	⇒ [3-4]

4.2 著者-出版年制

著者-出版年制下的 \cite 跟 \citet 一样。

\cite{zhangkun1994}	⇒张昆 等 (1994)
\citet{zhangkun1994}	⇒张昆 等 (1994)
\citep{zhangkun1994}	⇒(张昆 等, 1994)
\cite[42]{zhangkun1994}	⇒(张昆 等, 1994) ⁴²
\citep{zhangkun1994, zhukezhen1973}	⇒(张昆 等, 1994; 竺可桢, 1973)

注意，引文参考文献的每条都要在正文中标注^[3-36]。

插图索引

图 1.1	强化学习工作原理	3
图 2.1	示例图片标题	4
图 2.2	多个分图的示例	5

表格索引

表 2.1	三线表示例	5
表 2.2	带附注的表格示例	5
表 2.3	跨页长表格的表题	5

参考文献

- [1] Verbeke J, Schutter J D. Experimental maneuverability and agility quantification for rotary unmanned aerial vehicle[J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2018, 10(1): 3-11.
- [2] Ackermann E. Ai-powered drone learns extreme acrobatics[J]. IEEE Spectrum, 2020.
- [3] 张昆, 冯立群, 余昌钰, 等. 机器人柔性手腕的球面齿轮设计研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1994, 34(2): 1-7.
- [4] 竺可桢. 物理学论[M]. 北京: 科学出版社, 1973: 56-60.
- [5] Dupont B. Bone marrow transplantation in severe combined immunodeficiency with an unrelated mhc compatible donor[C]//White H J, Smith R. Proceedings of the third annual meeting of the International Society for Experimental Hematology. Houston: International Society for Experimental Hematology, 1974: 44-46.
- [6] 郑开青. 通讯系统模拟及软件[D]. 北京: 清华大学无线电系, 1987.
- [7] 姜锡洲. 一种温热外敷药制备方案: 中国, 88105607.3[P]. 1980-07-26.
- [8] 中华人民共和国国家技术监督局. GB3100-3102. 中华人民共和国国家标准-量与单位[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [9] Merkt F, Mackenzie S R, Softley T P. Rotational autoionization dynamics in high rydberg states of nitrogen[J]. J Chem Phys, 1995, 103: 4509-4518.
- [10] Mellinger A, Vidal C R, Jungen C. Laser reduced fluorescence study of the carbon monoxide nd triplet rydberg series - experimental results and multichannel quantum defect analysis[J]. J Chem Phys, 1996, 104: 8913-8921.
- [11] Bixon M, Jortner J. The dynamics of predissociating high Rydberg states of NO[J]. J Chem Phys, 1996, 105: 1363-1382.
- [12] 马辉, 李俭, 刘耀明, 等. 利用 REMPI 方法测量 BaF 高里德堡系列光谱[J]. 化学物理学报, 1995, 8: 308-311.
- [13] Carlson N W, Taylor A J, Jones K M, et al. Two-step polarization-labeling spectroscopy of excited states of Na₂[J]. Phys Rev A, 1981, 24: 822-834.
- [14] Taylor A J, Jones K M, Schawlow A L. Scanning pulsed-polarization spectrometer applied to Na₂[J]. J Opt Soc Am, 1983, 73: 994-998.
- [15] Taylor A J, Jones K M, Schawlow A L. A study of the excited $1\Sigma_g^+$ states in Na₂[J]. Opt Commun, 1981, 39: 47-50.

- [16] Shimizu K, Shimizu F. Laser induced fluorescence spectra of the $a\ 3\Pi_u-X\ 1\Sigma_g^+$ band of Na_2 by molecular beam[J]. J Chem Phys, 1983, 78: 1126-1131.
- [17] Atkinson J B, Becker J, Demtröder W. Experimental observation of the $a\ 3\Pi_u$ state of Na_2 [J]. Chem Phys Lett, 1982, 87: 92-97.
- [18] Kusch P, Hessel M M. Perturbations in the $a\ 1\Sigma_u^+$ state of Na_2 [J]. J Chem Phys, 1975, 63: 4087-4088.
- [19] 广西壮族自治区林业厅. 广西自然保护区[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [20] 霍斯尼. 谷物科学与工艺学原理[M]. 李庆龙, 译. 2 版. 北京: 中国食品出版社, 1989: 15-20.
- [21] 王夫之. 宋论[M]. 刻本. 金陵: 曾氏, 1865 (清同治四年) .
- [22] 赵耀东. 新时代的工业工程师[M/OL]. 台北: 天下文化出版社, 1998[1998-09-26]. <http://www.ie.nthu.edu.tw/info/ie.newie.htm>.
- [23] 全国信息与文献工作标准化技术委员会出版物格式分委员会. GB/T 12450-2001 图书书名页[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 1.
- [24] 全国出版专业职业资格考试办公室. 全国出版专业职业资格考试辅导教材: 出版专业理论与实务·中级[M]. 2014 版. 上海: 上海辞书出版社, 2004: 299-307.
- [25] World Health Organization. Factors regulating the immune response: Report of WHO Scientific Group[R]. Geneva: WHO, 1970.
- [26] Peebles P Z, Jr. Probability, random variables, and random signal principles[M]. 4th ed. New York: McGraw Hill, 2001.
- [27] 白书农. 植物开花研究[M]//李承森. 植物科学进展. 北京: 高等教育出版社, 1998: 146-163.
- [28] Weinstein L, Swertz M N. Pathogenic properties of invading microorganism[M]//Sodeman W A, Jr, Sodeman W A. Pathologic physiology: mechanisms of disease. Philadelphia: Saunders, 1974: 745-772.
- [29] 韩吉人. 论职工教育的特点[C]//中国职工教育研究会. 职工教育研究论文集. 北京: 人民教育出版社, 1985: 90-99.
- [30] 中国地质学会. 地质评论[J]. 1936, 1(1)-. 北京: 地质出版社, 1936-.
- [31] 中国图书馆学会. 图书馆学通讯[J]. 1957(1)-1990(4). 北京: 北京图书馆, 1957-1990.
- [32] American Association for the Advancement of Science. Science[J]. 1883, 1(1)-. Washington, D.C.: American Association for the Advancement of Science, 1883-.
- [33] 傅刚, 赵承, 李佳路. 大风沙过后的思考[N/OL]. 北京青年报, 2000-04-12(14)[2002-03-06]. <http://www.bjyouth.com.cn/Bqb/20000412/B/4216%5ED0412B1401.htm>.
- [34] 萧钰. 出版业信息化迈入快车道[EB/OL]. (2001-12-19)[2002-04-15]. <http://www.creader.com/news/20011219/200112190019.htm>.

- [35] Online Computer Library Center, Inc. About OCLC: History of cooperation[EB/OL]. [2000-01-08]. <http://www.oclc.org/about/cooperation.en.htm>.
- [36] Scitor Corporation. Project scheduler[CP/DK]. Sunnyvale, Calif.: Scitor Corporation, 1983.

致 谢

衷心感谢导师 ××× 教授和物理系 ×× 副教授对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

在美国麻省理工学院化学系进行九个月的合作研究期间，承蒙 Robert Field 教授热心指导与帮助，不胜感激。

感谢 ××××× 实验室主任 ××× 教授，以及实验室全体老师和同窗们学的热情帮助和支持！

本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____ 日 期：_____