

清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目：小型仿生跳跃滑翔运动装置

系 别：电子工程系

专 业：电子信息科学与技术

姓 名：毕骏达

指导教师：孙忆南

2020 年 5 月 19 日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签 名：_____ 导师签名：_____ 日 期：_____

中文摘要

小型机器人能量密度高、运动灵活，在救援、侦察等方面有着巨大应用潜力，同时也因其易于制造和调试的特点而备受研究者青睐。本文作者以仿生设计出发，模仿自然界的蜜袋鼯设计了一种兼具跳跃和滑翔功能的小型运动装置，致力于改善小型机器人跳跃过程中的飞行性能，达到延长跳跃距离、提高空中姿态稳定性的目的。

本文的创新点主要有：

- 在当前世界最先进的跳跃机器人的研究基础上增加了滑翔机构；
- 通过降维设计降低了机构制造成本；
- 通过磁场来储存能量，提供跳跃所需爆发力矩；
- 设计了精巧的榫卯结构，使主控板与机身各部件可靠连接。

关键词：小型机器人；仿生设计；跳跃；滑翔；降维设计

ABSTRACT

Mini-robots enjoy high power density and agility, which grants them great potential in applications such as reconnaissance, search and rescue. They are also welcomed by researchers due to being easier to produce and debug. Utilizing bio-mimic design, the author of this article designed a palm-sized robot capable of jumping and gliding imitating sugar gliders, aiming to improve the flight performance of the jumping robot, prolong jumping distance as well as stable in-the-air attitude.

The innovations of this article are:

- Added gliding feature to state-of-the-art research of jumping robots.
- Reduced manufacture cost by dimension reduction design.
- Storing energy in the magnetic field to provide explosive torque required by the jumping afterwards.
- Robustly connected the main controller board to the body with carefully designed mortise and tenon structure.

Keywords: Mini-robot; bio-mimic; jump; glide; dimension reduction design

目 录

主要符号对照表

ICRA	国际机器人与自动化会议 (International Conference on Robotics and Automation)
SEA	串联弹性驱动 (Series-Elastic Actuation)
SMA	形状记忆合金 (Shape Memory Alloy)
KV 值	每 V 电压对应无刷电机转数 (rpm)
BOM	材料清单 (Bill Of Materials)

第 1 章 引言

1.1 研究背景

近些年来，机器人研究的方向逐渐从大型机械、传统制造转向小型化、快速制造、精细控制、人机交互等方面，仿生设计也始终是热门关注点。传统的轮式机器人已经比较成熟，而不能满足复杂地形的需要，因此足式机器人引发了许多研究者的关注。这方面进展最快的莫过于四足机器人，上至波士顿动力的 Spot 机器狗¹，下至斯坦福本科生开发的低成本开源四足机器人 Doggo²，大有全民机器狗之势。而其他形式的仿生机器人研究也并未式微，如普渡大学的机器蜂鸟³，斯坦福的单足跳跃机器人 Salto-1P⁴，都是小型机器人的优秀代表，后者更是亮相 ICRA 2019，与众多机器狗同台竞技，业内人称“蒙特利尔动物园”。

1.2 相关研究

1.2.1 Salto

本项目的直接灵感来自于 Salto-1P。Salto-1P 是来自加州大学伯克利分校仿生微系统实验室的跳跃机器人。

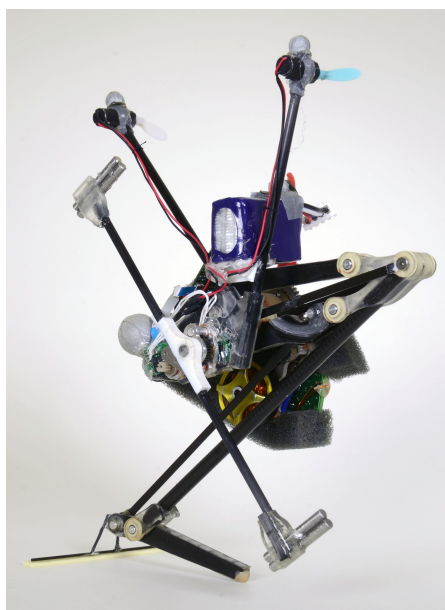


图 1.1 Salto-1P 机器人⁴

Salto-1P 的主要特点是通过 SEA 驱动结构实现了能量的存储，以保证跳跃瞬间的能量爆发。它可以每 0.58 秒进行一次高度 1m 的连续跳跃，这样的敏捷性无疑是惊人的。初代 Salto? 腿长约 15cm，重约 100g，能量密度 137W/kg，各方面指标已经接近或超越其设计之初的模仿对象——自然界的夜猴。为了实现精确控制，Salto 身上装备了用于控制姿态的尾部，Salto-1P 还配备了一对螺旋桨。前者在研究中只进行一次跳跃，而后者由于通过两个螺旋桨控制横滚 (Roll) 和偏航 (Yaw)，再加上尾部对俯仰 (Pitch) 的控制，实现了对空中身体姿态三个自由度的完全操控，因此可以做到连续跳跃。

对本项目的启示：

- 本项目的弹跳部分设计参照了 Salto 腿部的机械模式，以提供有利于弹跳的机械增益曲线。

1.2.2 Multimo-bat

Multimo-bat 多模态蝙蝠机器人是 CMU 机械系一位博士生 2014 年的作品。

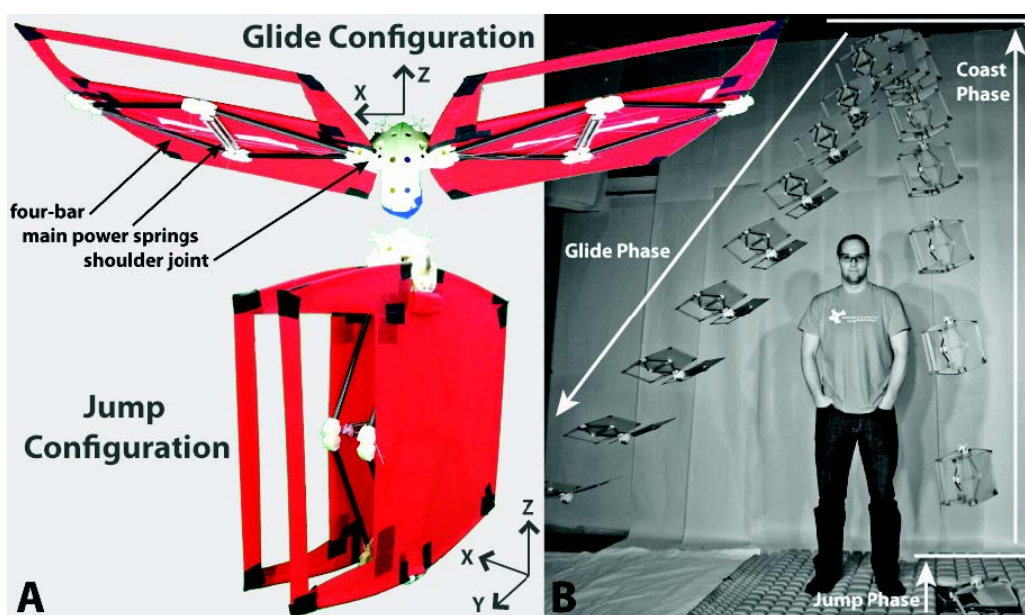


图 1.2 Multimo-bat 机器人?

如图??所示，该机器人主要拥有两个形态：跳跃态和滑翔态。其主要结构由身体和四连杆可折叠机翼构成。一个完整的跳跃滑翔运动过程如下：

1. 图??(a) 中的主电机转动带动图中白线拉紧，此时四连杆收缩，电能转化为翼上弹簧的弹性势能存储起来。当收紧到一定程度后，触发内部结构的离合装置，充能完毕。

2. 图??(b) 中的 SMA 丝通电发热收缩拉动离合器解锁，机翼快速弹回原位，弹簧释放能量，机器人跳起。
3. 当机器人跳至最高点时，张开机翼，进入无动力滑翔模式。

对本项目的启示：

- 该项目的整体功能与本项目目标基本相同，其滑翔模式下通过控制重心来调整机翼攻角而不增加自由度的思想可以简化系统设计，增加鲁棒性。

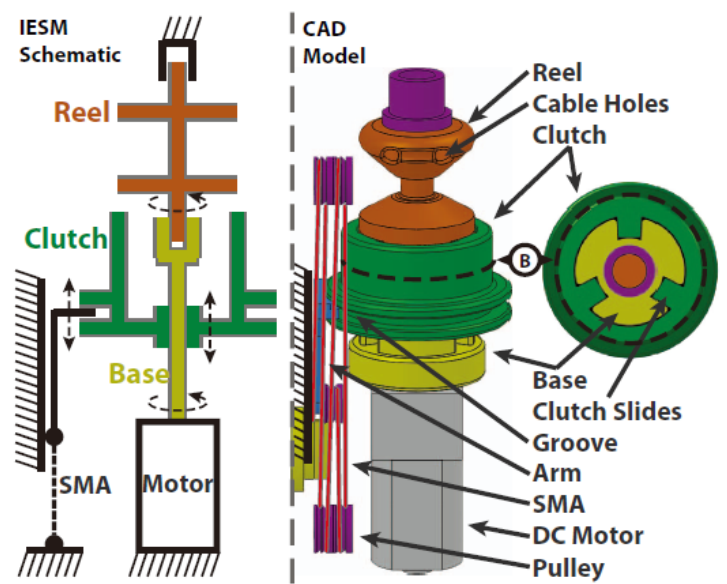
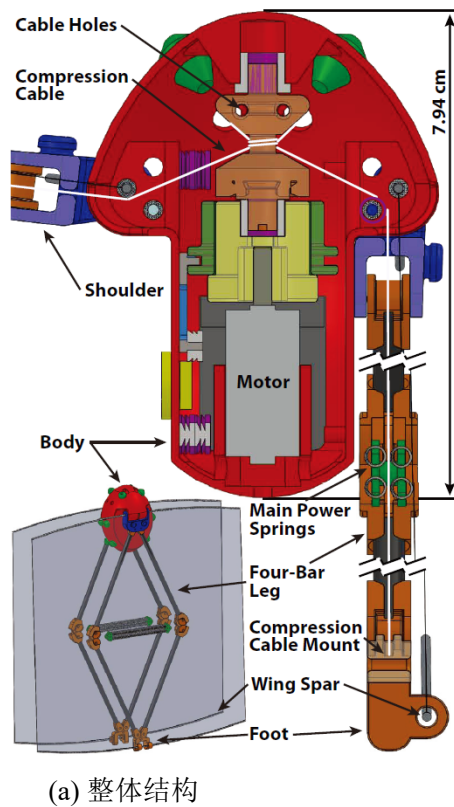


图 1.3 Multimo-bat 主要结构？

1.2.3 EPFL Jumpglider

对本文的启示：

- 给出了跳跃滑翔模型的理论基础，以及最优化滑翔距离的方式。

第 2 章 整体设计

本项目选择把跳跃和滑翔分开作为两个独立的过程来分析与控制，用一个无刷电机驱动跳跃部分，用一个舵机控制机翼的开合。

2.1 理论计算

取 $g = 9.8m/s^2$ ，预计机器人重量 $m = 200g$ ，跳跃高度 $h = 1m$ ，起跳电机做功时间 $t = 0.1s$ ，则机器人所需最小动能：

$$W_k = mgh \quad (2-1)$$

二级齿轮减速器机械效率估计为 $\eta = 80\%$ ，则所需电机输出最小平均功率：

$$\bar{P}_{min} = \frac{W_k}{t \cdot \eta} \quad (2-2)$$

解得：

$$\bar{P}_{min} = 24.5(W)$$

二级齿轮减速器减速比大约在 $10 \sim 30:1$ ，设计中一次起跳输出级齿轮大约需要转半圈，取减速比 $20:1$ ，则所需无刷电机转速：

$$\omega_{min} = 0.5 \times 10 \div t \times 60 = 6000(rpm)$$

使用 2S 锂离子电池，额定电压 $V = 7.4V$ ，则所需最小电机 KV 值：

$$KV_{min} = \omega_{min} \div V = 810(rpm/V)$$

一般来讲 KV 值越小无刷电机转矩越大，根据计算及机械需求考虑，选择了最大功率 $P_{max} = 168W$ 的朗宇 X2305 航模无刷电机，KV 值 $KV = 1450$ 。

机器人起跳最小速度：

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2-3)$$

根据动量定理：

$$\bar{F} \cdot t = m \cdot v \quad (2-4)$$

解得所需平均力：

$$\bar{F} = 8.854(N)$$

航模用无刷电机的力矩数据不好获得，我们通过相同工作条件下的带螺旋桨升力进行估算，实际输出力只会更大。电机参数显示 6000rpm 时的升力等效质量约为 $m_f = 200 \sim 300g$ ，即经减速器输出的力为：

$$F_{min} = m_{f,min} \cdot g \cdot 20 = 39.2(N) > \bar{F}$$

此处还未考虑腿部连杆结构带来的机械增益，而其均值应 >1 ，因此理论上输出力是足够支持跳跃的。

2.2 元件选型

根据上述计算过程与现实考量，选择元件如表??所示。

表 2.1 BOM 表

元件名	描述
朗宇 X2305 无刷电机	外转子无刷电机，KV 值 1450
NanoPi Duo2 开发板	全志 H3 主控，运行 Ubuntu 18.04
FOC 电机控制板	基于 STSPINF0A 方案的 BLDC 矢量控制
EMAX 2S 航模锂电池	容量 300mAh，质量为 15g
DS-S002M 4.3g 数字舵机	用于控制机翼开合
OV5640 摄像头	500W 像素，1080p@30fps,720p@60fps

2.3 机械设计

初步设计的机器人整体结构三维仿真图如下 (螺丝等固定细节略去)：



图 2.1 整体结构渲染图

2.3.1 跳跃部分

参考 Salto? 的腿部模型，此处实现了如图??所示的连杆结构。其中灰色圆为输出级齿轮，带动上部的曲柄-摇臂四连杆结构，同时四连杆摇臂为一凹四边形块，与机身相连的另一点在下部又组成了一个平行四边形四连杆，在输出级利用杠杆结构增大位移，实现触地端的较大速度，从而使身体跳起。虽然看上去略显复杂，但总体形态接近自然界大多数生物的腿部构造，这也从一个侧面反映了该结构的合理性。

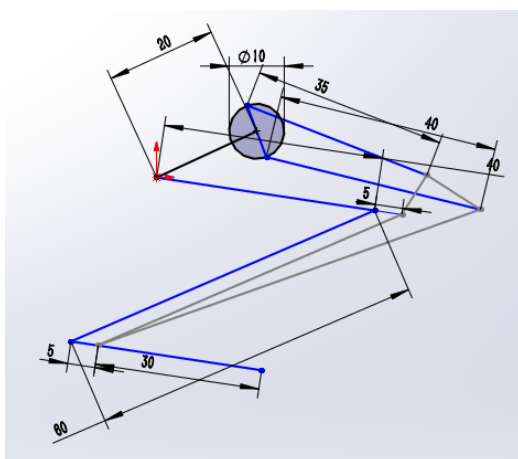


图 2.2 起跳前准备姿势

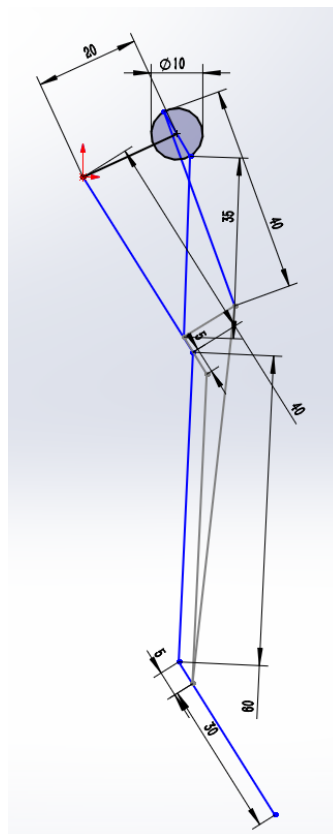


图 2.3 起跳后空中姿势

据此尺寸在 SolidWorks 中设计出三维模型，装配示意图如图??所示。

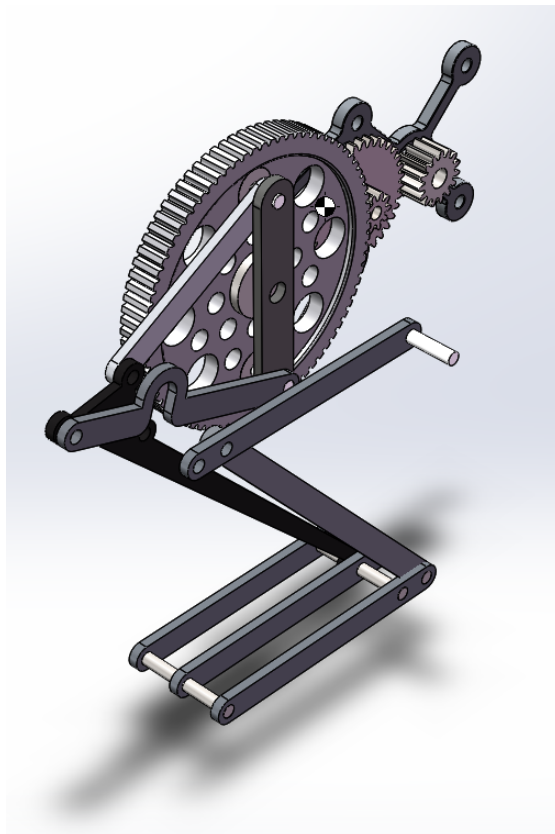


图 2.4 腿部装配图

2.3.2 插图

强烈推荐《 $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ 插图指南》！关于子图形的使用细节请参看 `subcaption` 宏包的说明文档。

2.3.2.1 一个图形

一般图形都是处在浮动环境中。之所以称为浮动是指最终排版效果图形的位置不一定与源文件中的位置对应^①，这也是刚使用 \LaTeX 同学可能遇到的问题。如果要强制固定浮动图形的位置，请使用 `float` 宏包，它提供了 `[H]` 参数，比如图 ??。



图 2.5 利用 Xfig 制图

^① This is not a bug, but a feature of \LaTeX !

大学之道，在明明德，在亲民，在止于至善。知止而后有定；定而后能静；静而后能安；安而后能虑；虑而后能得。物有本末，事有终始。知所先后，则近道矣。古之欲明明德于天下者，先治其国；欲治其国者，先齐其家；欲齐其家者，先修其身；欲修其身者，先正其心；欲正其心者，先诚其意；欲诚其意者，先致其知；致知在格物。物格而后知至；知至而后意诚；意诚而后心正；心正而后身修；身修而后家齐；家齐而后国治；国治而后天下平。自天子以至于庶人，壹是皆以修身为本。其本乱而未治者否矣。其所厚者薄，而其所薄者厚，未之有也！

——《大学》

2.3.2.2 多个图形

如果多个图形相互独立，并不共用一个图形计数器，那么用 `minipage` 或者 `parbox` 就可以。否则，请参看图 ??，它包含两个小图，分别是图 ??和图 ??。推荐使用 `\subcaptionbox`，因为可以像图 ?? 那样对齐子图的标题，也可以使用 `subcaption` 宏包的 `\subcaption`（放在 `minipage` 中，用法同 `\caption`）或是 `subfigure`、`subtable` 环境，像图 ??，不要再用 `\subfloat`、`\subfigure` 和 `\subtable`。



(a) 第一个小图形



(b) 第二个小图形，注意这个图略矮些。
如果标题很长的话，它会自动换行

图 2.6 包含子图形的大图形 (`subcaptionbox` 示例)



(a) 第一个小图形



(b) 第二个小图形，注意这个图略矮些。`subfigure` 中同一行的子图在顶端对齐。

图 2.7 包含子图形的大图形 (`subfigure` 示例)

古之学者必有师。师者，所以传道受业解惑也。人非生而知之者，孰能无惑？



清华大学
Tsinghua University

图 2.8 并排第一个图



清华大学
Tsinghua University

图 2.9 并排第二个图

惑而不从师，其为惑也，终不解矣。生乎吾前，其闻道也固先乎吾，吾从而师之；生乎吾後，其闻道也亦先乎吾，吾从而师之。吾师道也，夫庸知其年之先後生於吾乎！是故无贵无贱无长无少，道之所存，师之所存也。

嗟乎！师道之不传也久矣，欲人之无惑也难矣。古之圣人，其出人也远矣，犹且从师而问焉；今之众人，其下圣人也亦远矣，而耻学於师。是故圣益圣，愚益愚。圣人之所以为圣，愚人之所以为愚，其皆出於此乎？爱其子，择师而教之，於其身也，则耻师焉，惑焉。彼童子之师，授之书而习其句读者，非吾所谓传其道、解其惑者也。句读之不知，惑之不解，或师焉，或不焉，小学而大遗，吾未见其明也。巫医、乐师、百工之人不耻相师，士大夫之族曰“师”曰“弟子”之云者，则群聚而笑之。问之，则曰：彼与彼年相若也，道相似也，位卑则足羞，官盛则近谀。呜呼！师道之不复，可知矣。巫医、乐师、百工之人。吾子不齿，今其智乃反不能及，其可怪也欤！圣人无常师。孔子师郯子、苴子、师襄、老聃。郯子之徒，其贤不及孔子。孔子曰：“三人行，必有我师。”是故弟子不必不如师，师不必贤於弟子。闻道有先後，术业有专攻，如是而已。

如果要把编号的两个图形并排，那么小页就非常有用了：

李氏子蟠，年十七，好古文、六艺，经传皆通习之，不拘於时，学於余。余嘉其能行古道，作师说以贻之。

——韩愈（唐）

插图索引

表格索引

公式索引

致 谢

衷心感谢导师 xxx 教授和物理系 xxx 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 xxx 教授热心指导与帮助，不胜感激。感谢 xx 实验室主任 xx 教授，以及实验室全体老师和同学们的热情帮助和支持！本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

感谢 L^AT_EX 和 ThuThesis[?]，帮我节省了不少时间。

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：_____

附录 A 外文资料的调研阅读报告

Title of the Survey

写出至少 5000 外文印刷字符的调研阅读报告或者书面翻译 1-2 篇 (不少于 2 万外文印刷符)。

It is impossible to cover in a single chapter every concept of mathematical programming. This chapter introduces only the basic concepts and techniques of mathematical programming such that readers gain an understanding of them throughout the book.

A.1 Single-Objective Programming

The general form of single-objective programming (SOP) is written as follows,

$$\begin{cases} \max f(x) \\ \text{subject to:} \\ g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \end{cases}$$

which maximizes a real-valued function f of $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ subject to a set of constraints.

Definition A.1: In SOP, we call x a decision vector, and x_1, x_2, \dots, x_n decision variables. The function f is called the objective function. The set

$$S = \{x \in \mathbf{R}^n \mid g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, p\}$$

is called the feasible set. An element x in S is called a feasible solution.

Definition A.2: A feasible solution x^* is called the optimal solution of SOP if and only if

$$f(x^*) \geq f(x) \tag{A-1}$$

for any feasible solution x .

One of the outstanding contributions to mathematical programming was known as the Kuhn-Tucker conditions^{??}. In order to introduce them, let us give some definitions. An inequality constraint $g_j(x) \leq 0$ is said to be active at a point x^* if $g_j(x^*) = 0$. A point x^* satisfying $g_j(x^*) \leq 0$ is said to be regular if the gradient vectors $\nabla g_j(x)$ of all active constraints are linearly independent.

Let x^* be a regular point of the constraints of SOP and assume that all the functions $f(x)$ and $g_j(x), j = 1, 2, \dots, p$ are differentiable. If x^* is a local optimal solution, then there exist Lagrange multipliers $\lambda_j, j = 1, 2, \dots, p$ such that the following Kuhn-Tucker conditions hold,

$$\begin{cases} \nabla f(x^*) - \sum_{j=1}^p \lambda_j \nabla g_j(x^*) = 0 \\ \lambda_j g_j(x^*) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p. \end{cases} \quad (\text{A-2})$$

If all the functions $f(x)$ and $g_j(x), j = 1, 2, \dots, p$ are convex and differentiable, and the point x^* satisfies the Kuhn-Tucker conditions (??), then it has been proved that the point x^* is a global optimal solution of SOP.

A.1.1 Linear Programming

If the functions $f(x), g_j(x), j = 1, 2, \dots, p$ are all linear, then SOP is called a *linear programming*.

The feasible set of linear is always convex. A point x is called an extreme point of convex set S if $x \in S$ and x cannot be expressed as a convex combination of two points in S . It has been shown that the optimal solution to linear programming corresponds to an extreme point of its feasible set provided that the feasible set S is bounded. This fact is the basis of the *simplex algorithm* which was developed by Dantzig as a very efficient method for solving linear programming.

Roughly speaking, the simplex algorithm examines only the extreme points of the feasible set, rather than all feasible points. At first, the simplex algorithm selects an extreme point as the initial point. The successive extreme point is selected so as to improve the objective function value. The procedure is repeated until no improvement in objective function value can be made. The last extreme point is the optimal solution.

Table 1 This is an example for manually numbered table, which would not appear in the list of tables

Network Topology		# of nodes	# of clients			Server
GT-ITM	Waxman Transit-Stub	600	2%	10%	50%	Max. Connectivity
Inet-2.1		6000				
Xue	Rui	Ni	ThuThesis			
	ABCDEF					

A.1.2 Nonlinear Programming

If at least one of the functions $f(x), g_j(x), j = 1, 2, \dots, p$ is nonlinear, then SOP is called a *nonlinear programming*.

A large number of classical optimization methods have been developed to treat special-structural nonlinear programming based on the mathematical theory concerned with analyzing the structure of problems.



Figure 1 This is an example for manually numbered figure, which would not appear in the list of figures

Now we consider a nonlinear programming which is confronted solely with maximizing a real-valued function with domain \mathbf{R}^n . Whether derivatives are available or not, the usual strategy is first to select a point in \mathbf{R}^n which is thought to be the most likely place where the maximum exists. If there is no information available on which to base such a selection, a point is chosen at random. From this first point an attempt is made to construct a sequence of points, each of which yields an improved objective function value over its predecessor. The next point to be added to the sequence is chosen by analyzing the behavior of the function at the previous points. This construction continues until some termination criterion is met. Methods based upon this strategy are called *ascent methods*, which can be classified as *direct methods*, *gradient methods*, and *Hessian methods* according to the information about the behavior of objective function f . Direct methods require only that the function can be evaluated at each point. Gradient methods require the evaluation of first derivatives of f . Hessian methods require the evaluation of second derivatives. In fact, there is no superior method for all problems. The efficiency

of a method is very much dependent upon the objective function.

A.1.3 Integer Programming

Integer programming is a special mathematical programming in which all of the variables are assumed to be only integer values. When there are not only integer variables but also conventional continuous variables, we call it *mixed integer programming*. If all the variables are assumed either 0 or 1, then the problem is termed a *zero-one programming*. Although integer programming can be solved by an *exhaustive enumeration* theoretically, it is impractical to solve realistically sized integer programming problems. The most successful algorithm so far found to solve integer programming is called the *branch-and-bound enumeration* developed by Balas (1965) and Dakin (1965). The other technique to integer programming is the *cutting plane method* developed by Gomory (1959).

Uncertain Programming (BaoDing Liu, 2006.2)

在学期间参加课题的研究成果

个人简历

xxxx 年 xx 月 xx 日出生于 xx 省 xx 县。

xxxx 年 9 月考入 xx 大学 xx 系 xx 专业，xxxx 年 7 月本科毕业并获得 xx 学士学位。

xxxx 年 9 月免试进入 xx 大学 xx 系攻读 xx 学位至今。

发表的学术论文

- [1] Yang Y, Ren T L, Zhang L T, et al. Miniature microphone with silicon- based ferroelectric thin films. Integrated Ferroelectrics, 2003, 52:229-235. (SCI 收录, 检索号:758FZ.)
- [2] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 硅基铁电微声学器件中薄膜残余应力的研究. 中国机械工程, 2005, 16(14):1289-1291. (EI 收录, 检索号:0534931 2907.)
- [3] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 集成铁电器件中的关键工艺研究. 仪器仪表学报, 2003, 24(S4):192-193. (EI 源刊.)
- [4] Yang Y, Ren T L, Zhu Y P, et al. PMUTs for handwriting recognition. In press. (已被 Integrated Ferroelectrics 录用. SCI 源刊.)
- [5] Wu X M, Yang Y, Cai J, et al. Measurements of ferroelectric MEMS microphones. Integrated Ferroelectrics, 2005, 69:417-429. (SCI 收录, 检索号:896KM)
- [6] 贾泽, 杨轶, 陈兢, 等. 用于压电和电容微麦克风的体硅腐蚀相关研究. 压电与声光, 2006, 28(1):117-119. (EI 收录, 检索号:06129773469)
- [7] 伍晓明, 杨轶, 张宁欣, 等. 基于 MEMS 技术的集成铁电硅微麦克风. 中国集成电路, 2003, 53:59-61.

研究成果

- [1] 任天令, 杨轶, 朱一平, 等. 硅基铁电微声学传感器畴极化区域控制和电极连接的方法: 中国, CN1602118A. (中国专利公开号)
- [2] Ren T L, Yang Y, Zhu Y P, et al. Piezoelectric micro acoustic sensor based on ferroelectric materials: USA, No.11/215, 102. (美国发明专利申请号)

综合论文训练记录表

学生姓名		学号		班级	
论文题目					
主要内容以及进度安排	<div>指导教师签字：_____</div> <div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				
中期考核意见	<div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				

指导教师评语	<div>指导教师签字：_____</div> <div>年 月 日</div>
评阅教师评语	<div>评阅教师签字：_____</div> <div>年 月 日</div>
答辩小组评语	<div>答辩小组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>

总成绩：_____

教学负责人签字：_____

年 月 日