

## 面向微小型机器人的 5.8 GHz 微波能量传输系统

王鹏飞, 肖剑山, 李满天, 孙立宁

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 提出了面向微小型机器人的 5.8 GHz 微波能量传输系统, 采用 Ritz-Galerkin (RG) 方法建立了微波能量传输系统射频整流电路模型, 分析了整流二极管的整流性能, 得到了输入功率与输出电压、整流效率与负载比之间的关系. 设计了八木振子天线, 提高了能量接收的定向性. 最后搭建了微小型机器人微波能量传输实验系统, 开展了利用微波传输能量驱动微机器人的实验, 验证了利用微波能量传输系统为微小型机器人供能的可行性.

**关键词:** 微波; 无线能量传输; 5.8 GHz; 微小型机器人

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2010)-04-0529-05

### 5.8 GHz Microwave Power Transmission System for Micro-Robot

WANG Pengfei, XIAO Jianshan, LI Mantian, SUN Lining

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** A 5.8 GHz microwave power transmission system for micro robots is presented. The rectifying circuit model for the microwave power transmission system is established by Ritz-Galerkin (RG) method, and the features of rectifying diode are analyzed. The relations between input power and output voltage as well as the relations between rectifier efficiency and load ratio are derived. The Yagi-Uda antenna is designed to increase directional performance of power receiving. At last, the microwave power transmission experiment system for micro-robots is set up, and the experiment of driving micro-robot using power transmitted by microwave is carried out. Experiment results show that it is feasible to supply power for micro robots by the proposed microwave power transmission system.

**Keywords:** microwave; wireless power transmission; 5.8 GHz; micro-robot

## 1 引言 (Introduction)

微小型机器人体积小、成本低, 能够在极端环境和狭小空间内协作业, 在军事、民用等特殊场合有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>. 尺寸的缩小, 使得能量供给成为微小型机器人实用化的主要瓶颈之一<sup>[2]</sup>. 常规能源供给一般采用有缆方式或者电池供电方式. 采用有缆方式供电, 对微型机器人来说, 拖缆力与微机器人的牵引力相比是不可忽略的, 严重影响微型机器人的作业性能. 而采用电池供电的方式, 由于电池随着体积的缩小, 供电性能急剧下降, 无法满足机器人持续作业的需求. 无线能量传输具有持续供电、无缆操作等优点, 恰好满足微小型机器人的供电要求. 其中微波能量传输与其他无线能量传输方式相比更具以下优势: (1) 相比光伏供电, 具有更高的能量密度. 一般光伏电池输出功率密度只

有十几微瓦/平方米, 而微波能量功率密度能够达到数十至数百微瓦/平方米. 并且, 微波能量传输效率更高, 整流天线的效率一般为 70%~80%, 而光伏电池的效率只有 15%左右. (2) 相比于电磁感应(磁隙变压)供电方式, 具有更大的传输距离. 电磁感应式副线圈的接收功率随着磁隙的增大迅速减小, 一般要求间距小于 1 mm. 而微波能量的传输距离可以达到数米到数公里, 并且磁隙变压产生的电磁干扰会影响机器人控制电路.

微波能量传输的供电方式具有较长的传输距离、较高的功率密度及紧凑的结构, 这使其成为微小型机器人供电的理想方式. 近年来, 国外在该方面开展了研究, 日本 DENSO 公司开发了微波输电微型管道机器人<sup>[3]</sup>, Jenn 等研制成功利用微波能量传输工作的微型遥控飞行器 MRPV<sup>[4]</sup>. 国内在该方面

的研究刚刚起步, 2007年哈尔滨工业大学机器人研究所开发了利用 2.45 GHz 微波能量供能的平面微动机器人<sup>[5]</sup>, 由于频率较低, 存在难以小型化的问题. 本文在实验室原有的 2.45 GHz 微波能量传输系统的基础上, 为了进一步提高转换效率, 减小体积, 更好应用于微小型机器人, 提出了具有更高转换效率的 5.8 GHz 微波能量传输系统.

## 2 射频整流模型 (RF rectifier model)

射频整流与高电平检波的原理类似, 因此参照大信号检波的分析方法分析整流电路. 肖特基二极管的整流特性随入射功率电平的增加而变化, 首先采用 Ritz-Galerkin (RG) 方法, 预测整流二极管在大动态范围内的性能, 进而对本文中的应用进行建模分析.

### 2.1 Ritz-Galerkin 分析

RG 分析假设肖特基二极管由一个理想的外延二极管与小电阻  $R_S$  串联, 输入功率直接加载在输入终端, 根据文 [6], 得到归一化 RF 输入电压  $X$  的第一类零阶修正贝塞尔函数  $I_0(X)$

$$I_0(X) = \left(1 + \zeta + \frac{Y}{a}\right) \exp((1+b)Y + k\zeta) \quad (1)$$

式中,  $X$ ——归一化的 RF 输入电压,  $X = \Delta V_g$

$Y$ ——归一化输出电压,  $Y = \Delta V_0$

$a$ ——负载参数,  $a = \Delta R_L I_S$

$b$ ——电阻率,  $b = (R_g + R_S)/R_L$

$\zeta$ ——偏置电流参数,  $\zeta = I_{dc}/I_S$

$k$ ——偏置电路系数,  $k = \Delta R_S I_S$

又输入功率  $P_{inc}$  与输入电压  $V_g$  存在如下关系

$$P_{inc} = \frac{V_g^2}{8R_g} \quad (2)$$

$P_{inc}$  和  $V_0$  之间的关系为

$$I_0\left(\Delta\sqrt{8R_g P_{inc}}\right) = \left(1 + \frac{I_{dc}}{I_S} + \frac{V_0}{R_L I_S}\right) \times \exp\left(\left(1 + \frac{R_g + R_S}{R_L}\right) \Delta V_0 + \Delta R_S I_{dc}\right) \quad (3)$$

输出电压  $V_0(P_{inc})$  可以由式 (3) 计算得到. 根据文 [6] 中典型二极管和电路参数对 3 种不同负载电阻的预测曲线可以看出, 随着输入功率的增大, 整流二极管的输出特性从“平方律”到“线性”特性渐变. 因此, 对于大功率整流电路, 采用分段—线性的方法对电路特性进行分析是可行的.

### 2.2 整流电路的分段—线性分析

大功率整流电路模型如图 1 所示, 其中整流二极管表示为由小电阻  $R_S$  和一个在反向偏置时 ( $V < 0$ ) 断开、而正向偏置时 ( $V > 0$ ) 闭合的理想开关  $S$  串联组成. 从接收天线输入到整流二极管的功率源由电压源  $V_g \cos(\omega t)$  与一个内阻  $R_g$  串联组成, 其中  $R_g$  上消耗的功率为射频功率传输到整流二极管过程中的功率损耗, 它与低通滤波匹配电路有关. 假设在给定输入功率  $P_{inc}$  时, 整流二极管的输出电压即负载电压, 为  $V_0$ .

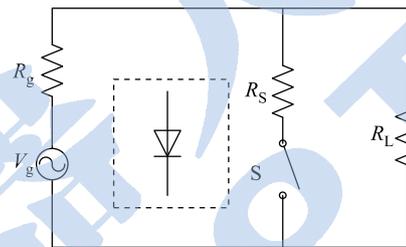


图 1 整流二极管模型

Fig.1 The model of rectifier diode

当  $V_g \cos(\omega t) - V_0 < 0$  时, 理想开关  $S$  闭合. 在一个周期内,  $S$  闭合时间为

$$-\arccos \frac{V_0}{V_g} \leq t \leq \arccos \frac{V_0}{V_g} \quad (4)$$

设整流二极管上的电压是加载在二极管上一个周期  $T$  内的平均电压, 一个整流周期时间为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (5)$$

令  $\theta_{on} = \arccos(V_0/V_g)$ , 则整流二极管上电压为

$$V_0 = \frac{1}{T} \left(\frac{R_L}{R_L + R_g}\right) \int_{\theta_{on}/\omega}^{(2\pi - \theta_{on})/\omega} (V_g \cos(\omega t) - V_0) dt \quad (6)$$

$$V_g \sin \theta_{on} = V_0 \left(\frac{\pi R_g}{R_L} + \theta_{on}\right) \quad (7)$$

令  $\alpha = \frac{V_0}{V_g}$ ,  $b = \frac{R_g}{R_L}$ , 有  $\sin \theta_{on} = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_{on}} = \sqrt{1 - \alpha^2}$ . 则式 (7) 化简为

$$\sqrt{1 - \alpha^2} = \alpha (\pi b + \arccos \alpha) \quad (8)$$

输出电压和输入电压比  $\alpha$  与负载阻抗和 RF 源内阻比之间的关系如图 2 所示. 可以看出, 大功率条件下, 整流电路的输出电压只与等效 RF 源内阻与负载阻抗比值有关, 且随负载电阻增加而增大, 但不成线性关系.

由式 (2), 得到整流二极管的电压为

$$V_0 = \alpha \sqrt{8R_g P_{inc}} \quad (9)$$

可以看出, 在负载阻抗一定的情况下, 射频整流电路的输出电压与输入功率平方根成正比。

根据假设, 在一个周期内直流负载消耗的功率  $P_{DC}$  为

$$P_{DC} = \left( \frac{V_g}{R_g + R_L} \right)^2 R_g T_{off} \quad (10)$$

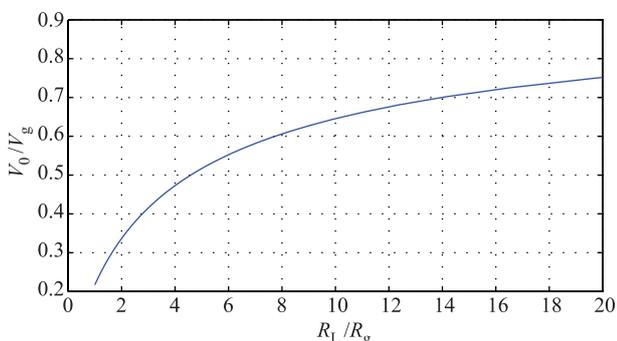


图 2 输出电压比与电阻比关系图

Fig.2 Relationship between output voltage and resistance ratio

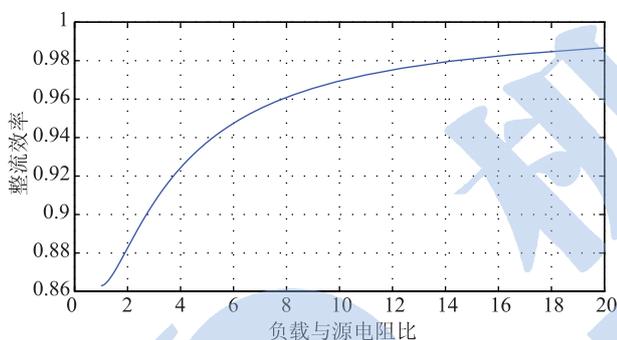


图 3 效率与负载比的关系图

Fig.3 Relationship between efficiency and load ratio

整流电路损失的功率  $P_{loss}$  为

$$P_{loss} = \frac{V_g^2}{R_g} T_{on} + \left( \frac{V_g}{R_g + R_L} \right)^2 R_g T_{off} \quad (11)$$

整流电路的效率  $\eta$  可以表示为

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{DC} + P_{loss}} = \frac{(R_g + R_L)^2 + R_g \beta}{(R_g + R_L)^2 + R_g (R_g + R_L) \beta} = \frac{1 + \left( \frac{b}{1+b} \right)^2 \beta}{1 + \frac{b}{1+b} \beta} \quad (12)$$

其中:  $\beta = \frac{T_{on}}{T_{off}} = \frac{\arccos \alpha}{\pi - \arccos \alpha}$ .

由式 (8)、(11)、(12), 得到输出效率与负载之间的关系如图 3 所示. 从图中可以看出, 在大功率输入条件下, 二极管整流效率随直流负载的电阻增大而增大. 但在实际电路中, 由于直流负载会影响到整流二极管的输入阻抗, 影响输入阻抗的匹配, 进

而影响整流天线的效率. 因此, 实际上整流天线的效率随着负载的变大而变大是有限的.

通过以上分析得知, 射频整流电路的效能取决于以下几个方面: 1) 天线方向性, 其性能高低影响着整流电路可转化功率大小; 2) 直流负载, 直流负载大小影响着整流电路的整流效率; 3) 滤波匹配网络, 它影响天线与整流电路的匹配程度, 进而影响传输到整流二极管上的功率, 影响整流效率.

### 3 整流天线设计 (Rectenna design)

#### 3.1 基本结构与原理

整流天线<sup>[7]</sup>主要由对称振子天线、低通滤波器、整流二极管、直通滤波器 4 部分组成, 如图 4 所示. 对称振子天线接收空间电磁波能量至馈线; 低通滤波器使工作频点的能量低插损通过并阻碍整流电路产生的二次或更高次谐波通过天线再次辐射到自由空间去; 整流二极管将射频能量转化为直流能量; 直通滤波器将直流能量以低插入损耗传输至负载, 而对于基频以及由整流电路产生的二次及以上谐波能量则起阻碍作用. 由此, 整流电路产生的二次和高次谐波在低通滤波器和整流电路间来回反射, 基频和高次谐波在直通滤波器和整流电路间来回反射、转换, 大大提高了射频能量转换为直流能量的效率.

八木对称振子天线具有高方向性, 同时具有结构简单、容易制作、容易与滤波匹配电路连接的特点, 又有较成熟的模型, 成为本文采用的整流天线的类型.

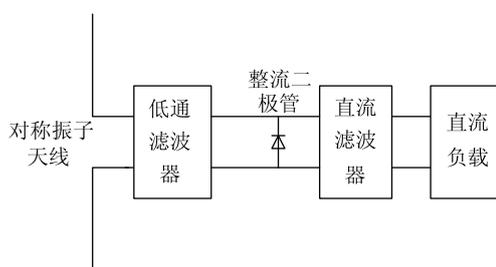


图 4 整流天线基本结构

Fig.4 The basic structure of rectenna

#### 3.2 八木对称振子天线设计

八木天线也称寄生天线、引向天线等. 典型的八木天线<sup>[8]</sup>是由一个有源半波振子、一个反向器和一个(或几个)引向器组成的线性端射天线, 即有一个连接到传输线上的偶极子, 还有若干个未连接、等距或不等距安装的平行阵列偶极子作引向器和反向器. 引向器和反向器的作用是将有源振子的能量引到主辐射方向上去. 有源振子加有高频电动势,

在八木天线周围空间产生电磁场,使得无源振子中出现感应电动势,产生相对应的高频电流,这些电流在周围空间再衍生电磁场,根据互感原理,在有源振子上将产生相应的感应电流.有源振子的总电流是激励电流和感应电流之和.如果反射器的长度、引向器的长度和它到有源振子的距离选择适当,使反射器和有源振子所产生的电磁场在某方向上相抵消,在相反方向上相叠加,则可使天线得到单向辐射特性,使天线辐射在引向器方向上形成较尖锐的波束.八木天线的单元越多,方向性越强,但是单元的增加不与方向性成正比.本文设计时,考虑到体积因素,采用一个反射器加上一个引向器结构的八木天线.

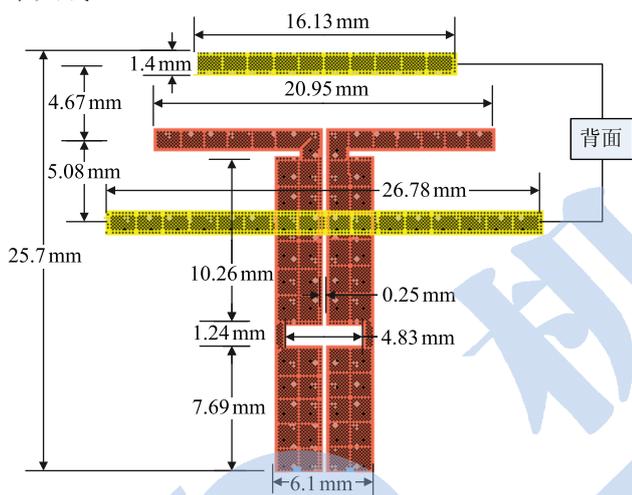


图5 八木整流天线版图

Fig.5 The layout of Yagi-Uda rectenna

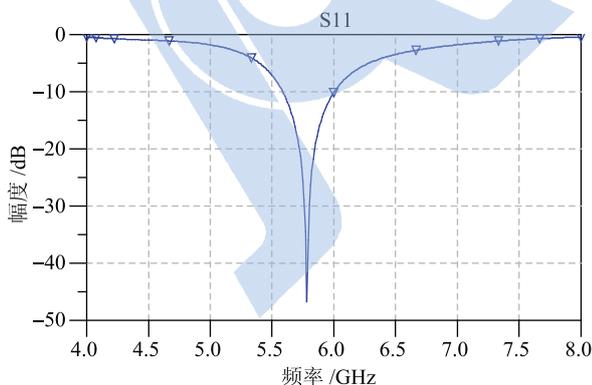


图6 八木整流天线 S11 仿真曲线

Fig.6 The S11 simulation curve of Yagi-Uda rectenna

八木天线的各个振子的长度及其间距的变化对天线的方向图及其它性能都有影响,设计中需根据工程经验尺寸经过仿真优化得到最佳的尺寸.本文采用典型尺寸,反射器到有源振子距离为  $0.15 \sim 0.25$  倍波长,指向器与有源振子距离为  $0.2 \sim 0.35$  倍波长.典型反射器长度为  $0.5\lambda$ ,指向器典型长度

比有源振子长度短  $10\% \sim 20\%$ .由于振子天线与反射器和引向器之间存在互耦效应,因此八木天线的输入阻抗小于振子天线的自阻抗,实际仿真得到天线的阻抗为  $30 \Omega$ .经过调整得到印刷八木天线版图如图5所示.经过电磁场仿真得到散射系数 S11 如图6所示,可以看出,天线在  $5.81 \text{ GHz}$  附近产生谐振,谐振点散射系数为  $-45 \text{ dB}$ ,  $-15 \text{ dB}$  以下可用带宽为  $400 \text{ MHz}$ ,较振子天线有缩小.仿真同时得到天线方向图如图7所示.天线方向性为  $5.95 \text{ dB}$ ,高于普通振子天线的  $2.15 \text{ dB}$ ,达到了提高天线定向性的目的.

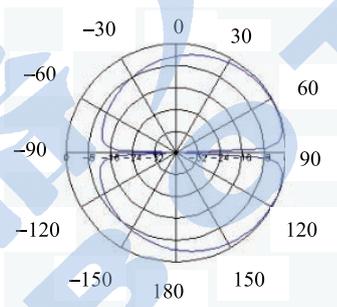


图7 八木整流天线 E 面方向图

Fig.7 The E plan radiation pattern of Yagi-Uda rectenna

## 4 系统构建及实验 (System construction and experiment)

### 4.1 发射天线

微波能量传输测试实验要求发射系统具有一定的带宽和功率控制能力,本研究中的发射天线采用喇叭天线,喇叭天线是由横截面逐渐扩展的波导形成的一种天线.它是最常用的微波天线之一,一般是把它用作反射器天线的馈源和阵列天线的辐射源,也可以用作微波中继站的单独天线.

喇叭天线由矩形波导或者圆形波导过渡段经过波导壁展开构成.本文采用圆喇叭天线作为系统的发射天线.圆喇叭天线由于开口较小,单位面积的功率相比于矩形喇叭天线要大,可以用来测量不同功率密度下的整流天线的输出电压,同时有足够功率水平满足微小型机器人的应用.

### 4.2 微波能量传输测试

为了验证微波能量的传输效果,搭建了微波能量传输实验系统,将机器人本体、驱动电路、整流天线组合成实验谐振机器人,如图8所示.谐振式微型移动机器人由基体和固连在机体上的谐振足组成.其中基体为  $1 \text{ mm}$  厚的电路板,在完成机械连接的同时也实现了电气上的连通;谐振足由  $0.2 \text{ mm}$  厚的不锈钢薄板经放电微细加工制成平面结构,粘接

双压电膜后再弯折而成。样机整体尺寸为  $69\text{ mm}\times 29\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ , 重仅为  $1.92\text{ g}$ 。当施加一定的激励频率时, 粘接双压电膜的机器人足发生谐振, 进而与行走表面发生反复碰撞, 形成高速运动。机器人最大速度可达  $100\text{ mm/s}$ , 最小功耗仅为  $10\text{ mW}$ 。

整流天线垂直安装在机器人本体上方, 其输出管脚焊在驱动电路的输入管脚。这样, 整流天线将接收到的微波能量转化为直流电, 通过驱动电路驱动谐振机器人运动。



图 8 微波能量驱动的谐振机器人

Fig.8 The resonant robot driven by microwave power

采用圆喇叭天线的微波能量传输系统为谐振机器人供能的实验装置如图 9 所示, 将谐振机器人置于钢导轨上, 圆喇叭发射天线置于整流天线上方  $5\text{ cm}$  处, 将发射系统的频率设为  $5.8\text{ GHz}$ , 同时将输出功率调到最大, 测量谐振机器人的驱动波形和移动速度。

实验中测量了机器人的输入能量数据, 经测量, 机器人驱动电压峰—峰值为  $7.2\text{ V}$ , 在负载为  $110\ \Omega$  时, 微波能量传输系统最大输出功率为  $105\text{ mW}$ , 转化效率为  $82\%$ , 高于原有  $2.4\text{ GHz}$  微波能量传输系统的转换效率。实验中, 在接近喇叭天线口径边缘时, 由于微波能量分布降低, 机器人的移动速度逐渐减小, 直至停止。

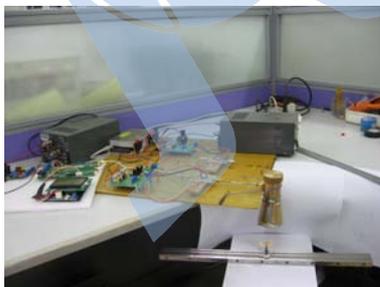


图 9 微波能量传输实验装置

Fig.9 Experimental device for microwave power transmission

## 5 结论 (Conclusion)

(1) 通过对微波能量传输系统的研究以及实验可以看出, 微波能量传输系统整流天线输出的直流电能能够维持谐振机器人以较高速度移动, 从而验

证了利用微波能量传输系统为小型机器人供能是可行的。

(2) 采用  $5.8\text{ GHz}$  微波进行能量传输可以提高转换效率, 在相同的输出功率下, 具有更小的体积, 为机器人的进一步小型化提供了一定的条件。

(3) 由于微波发射源的发射功率的限制, 目前微波能量传输的有效距离还比较近, 限制了小型机器人的运动范围。未来采用大功率微波源, 可以使机器人在较大空间范围进行运动作业, 也可以使多个机器人在空间内进行协作作业。

## 参考文献 (References)

- [1] 孙立宁, 周兆英, 龚振邦. MEMS 国内外发展状况及我国 MEMS 发展战略的思考[J]. 机器人技术与应用, 2002(2): 2-4.  
Sun Lining, Zhou Zhaoying, Gong Zhenbang. MEMS development status at home and abroad and discussion on domestic MEMS development strategy[J]. Robot Technique and Application, 2002(2): 2-4.
- [2] Donald B R, Levey C G, McGray C G, et al. An untethered, electrostatic, globally controllable MEMS micro-robot[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2006, 15(1): 1-15.
- [3] Shibata T, Sasaya T, Kawahara N. Development of in-pipe microrobot using microwave energy transmission[J]. Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2000, J83-B(5): 704-710.
- [4] Jenn D C, Vitale R L. Wireless power transfer for a micro remotely piloted vehicle[C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 590-593.
- [5] 李荣熙. 小型机器人微波电能传输系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
Li Rongxi. Research on microwave power transmission system for micro robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [6] Harrison R G, Lepolozec X. Nonsquarelaw behavior of diode detectors analyzed by the Ritz-Galerkin method[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1994, 42(5): 840-846.
- [7] Deng H L, Kong L. A novel high-efficiency rectenna for  $35\text{ GHz}$  wireless power transmission[C]//4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2004: 114-117.
- [8] Warren L, Stutzman G A T. 天线理论与设计[M]. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 187-196.  
Warren L, Stutzman G A T. Antenna theory and design[M]. 2 ed. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006: 187-196.

## 作者简介:

王鹏飞 (1977-), 男, 博士, 讲师。研究领域: 小型及仿生机器人, 机器人运动控制等。