

一种太赫兹机电波导开关的设计^①

牛之友^{1*},冯磊²,王书见¹,文春华¹

(1. 中电科仪器仪表有限公司,青岛 266000;

2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区,克拉玛依 834000)

摘要:针对太赫兹频段卫星通信系统对信号传输及切换的需求,设计了一种工作于114 GHz~173 GHz频段的无间隙C型机电波导开关。首先,采用等效电路理论进行传输线匹配设计,并分析了波导口宽边和窄边错位对电压驻波比的影响;之后,依据导体损耗理论分析了金属壁电导率对插入损耗的影响,并运用HFSS软件对通道长度、表面粗糙度等因素进行参数敏感性分析;最后,提出了一种新型扼流槽加载方式。结果表明:开关的驻波比与弯曲半径成正比,考虑到定子强度及小型化设计,应选择合适的弯曲半径;采用银镀层有利于提高插损指标,且在太赫兹频段,为降低插入损耗,微波通道的表面粗糙度应优于0.8 μm。最终,在114 GHz~173 GHz频段,开关的电压驻波比小于1.1,插入损耗小于0.45 dB,隔离度大于80 dB,耐功率为3000 W,满足设计要求。

关键词:太赫兹;C型;波导开关;无间隙

中图分类号: TN927+.23

文献标识码: A

文章编号: 1674-7135(2019)06-0010-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7135.2019.06.002

The Designing of A Terahertz-band Electromechanical Controlled Waveguide Switch

NIU Zhiyou^{1*}, FENG Lei², WANG Shujian¹, WENG Chunhua¹

(1. China Electronics Technology Instruments Co. Ltd, Qingdao 266000, China;

2. China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay 834000, China)

Abstract: In order to meet the requirement of signal transmission and switching in terahertz-band for satellite communication system, a gapless c-type waveguide switch operating in 114 ~ 173 GHz frequency band is designed. Firstly, the equivalent circuit theory is used to design the matching of transmission line, and influence of the wide and narrow edge dislocation of waveguide port on the voltage standing wave ratio (VSWR) is analyzed. Then, the influence of metal wall conductivity on insertion loss is analyzed according to conductor loss theory, and HFSS software is used to conduct sensitivity analysis for parameters of channel electrical length and surface roughness. Finally, a new method of loading choke groove is proposed. The results show that VSWR of the switch is proportional to the bending radius. Considering the strength of stator and miniaturization design, appropriate bending radius should be selected; Silver coating is beneficial to improve the index of insertion loss, and in terahertz-band, the surface roughness of microwave channel should be better than 0.8 μm in order to reduce insertion loss. Finally, in the 114 GHz ~ 173 GHz frequency band, the VSWR of the switch is less than 1.1, the insertion loss is less than 0.45 dB, the isolation is greater than 80 dB, and the power resistance is 3000 W, which meets the design requirements.

Key words: Terahertz-band; C-Type; Waveguide switch; Electromechanical control

^① 收稿日期:2019-07-18;修回日期:2019-09-09。

基金项目:毫米波波导探针制造与校准技术(6142001180101)

作者简介:牛之友(1984—),硕士。研究方法为机械式微波开关。E-mail:18555025267@163.com

0 引言

随着红外光技术和毫米波技术发展愈来愈成熟,位于二者之间的太赫兹波(频段 $0.1 \text{ THz} \sim 10 \text{ THz}$)毫无疑问成为下一代通信的发展方向。机电微波开关是通信系统中的关键元器件,随着太赫兹波测试方法与辐射源不断发展,太赫兹波逐渐广泛应用于雷达系统、卫星通信系统,对太赫兹微波开关的需求也不断增长。微波开关的主要功能是实现信号在不同通道间切换,当部分硬件失效时,可通过开关切换到备份硬件,提升系统可靠性^[1-3]。

根据传输线类型不同,机电式微波开关可以分为机电同轴开关和机电波导开关两种。机电同轴开关,因自身结构限制,目前最高工作频率为 67 GHz ,无法应用于太赫兹频段。相比之下,机电波导开关,具有更高的工作频率,且功率容量大、插入损耗小、频带宽,具备应用于太赫兹频段的潜力^[4,5]。因此,为满足下一代卫星通信系统对太赫兹信号切换的需求,有必要开展太赫兹机电波导开关的研制。

依据波导转子的通道数目不同,波导开关可以分为 C 型开关和 R 型开关^[6]。C 型开关有两条弯通道,可完成两种工作状态的变换,而 R 型开关相比于 C 型开关多了一条直通道,可完成四种工作状态的变换。目前通信系统中,C 型开关的应用更普遍一些,故而本文设计的开关为 C 型波导开关。

文章基于 Ansoft 公司的电磁仿真软件 HFSS 进行仿真,设计了一种工作于 $114 \text{ GHz} \sim 173 \text{ GHz}$ 频段的无间隙波导开关,与 Flann 公司设计的 29333 系列矩形波导开关实现对标。

1 波导开关结构

图 1 为 C 型波导开关的微波系统。通过转子在定子中的旋转可以实现两种稳定状态,状态 1:端口 1 和端口 2 导通,端口 3 和端口 4 导通;状态 2:端口 1 和端口 4 导通,端口 2 和端口 3 导通。

开关结构从上至下分别为驱动系统、电路系统、传动系统和微波系统,如图 2 所示。其中,电路系统的功能是实现电机施加激励的 TTL 控制,消除线圈反峰电压并提供开关状态信息;驱动系统的作用是将控制信号的电能转化为机械能,为波导开关状态切换提供动力,在无外部激励时将开关保持在原有位置状态;传动系统的功能是连接电机转子和微波转子,将电机旋转力矩传递到微波转子,从而驱动

微波通道的切换;微波传输系统主要是完成对微波信号的高质量传输,是微波传输通道切换的最终执行者。

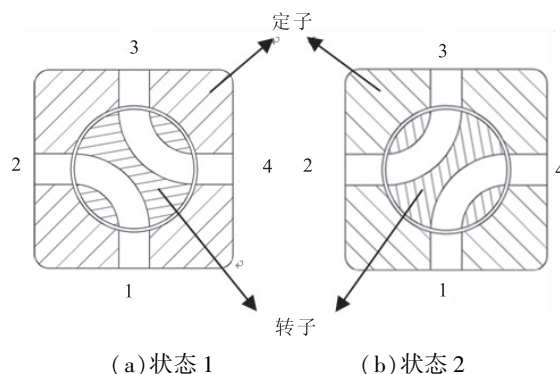


图 1 波导开关微波系统

Fig. 1 Microwave system of waveguide switch

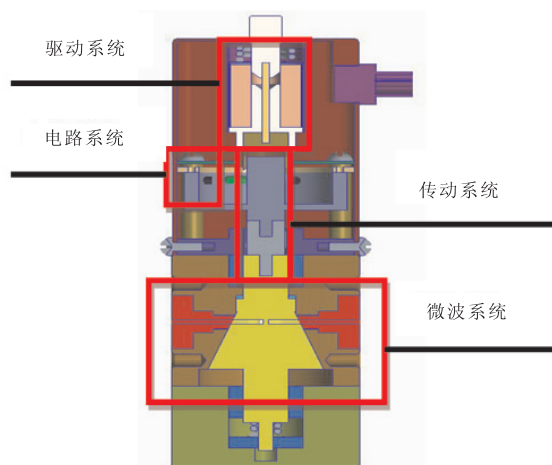


图 2 波导开关结构

Fig. 2 The structure of waveguide switch

2 微波系统设计

波导开关的射频指标主要为电压驻波比、插入损耗和隔离度。微波系统的设计合理与否,直接影响着波导开关的射频指标。传统波导开关的转子为圆柱形结构,在开有圆柱槽的定子内转动实现开关的状态变换。为保证转动可靠性,转子和定子在设计时具有一定间隙,电磁波在传输时会沿着此间隙在周向、径向泄漏,导致隔离度和插入损耗指标恶化。本文设计的开关微波转子呈锥形结构,与微波定子上的锥形孔接触配合,在理想情况下微波通道断开间隙为零^[5]。相对于传统的间隙波导开关,无间隙波导开关在更高的频率范围内具有更好的传输效果。表 1 为开关的射频参数。

2.1 传输线匹配设计

太赫兹波导开关的传输线为矩形波导,微波通道构成为“直波导-弯曲波导-直波导”形式。在太赫兹频段,频率高,工作波长降至毫米甚至亚毫米量级,微波通道微小失配就可能引起强烈的反射。失配主要来源于弧形通道的影响、波导口错位等。

表 1 射频参数

Tab.1 Radio frequency parameters

参数	指标要求
工作频率	114 GHz ~ 173 GHzP
电压驻波比	≤ 1.2
插入损耗	≤ 1.3 dB
隔离度	≥ 60 dB
耐功率	1 W

对于弧形通道的影响,主要关系着电压驻波比指标。随弧形半径的增加电压驻波比减小,通过等效电路理论可以实施定量分析^[7]。鉴于尺寸及射频驻波比指标要求,此开关将弧形半径设置为 3mm,经定量分析电压驻波比为 1.07。

对于波导口错位,由于无间隙波导开关内外微波通道断面是锥面结构,难以用等效电路理论进行精确计算,为此建立了无间隙波导开关的 HFSS 仿真模型,对波导口错位进行容差分析。模型如图 3 所示,仿真结果见图 4。依据以往研制经验,为满足电压驻波比 ≤ 1.2 ,仿真时电压驻波比应 ≤ 1.1 ,由图可知,此开关波导口宽边错位和窄边错位均应 ≤ 0.05 mm。

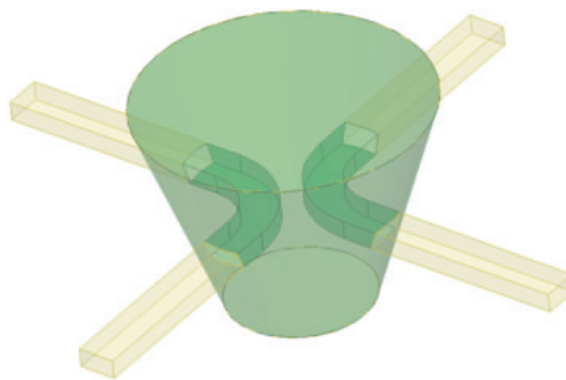
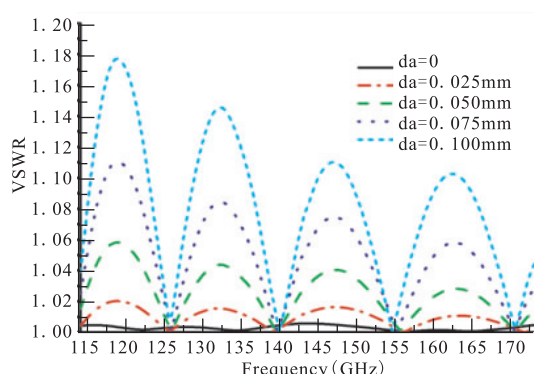
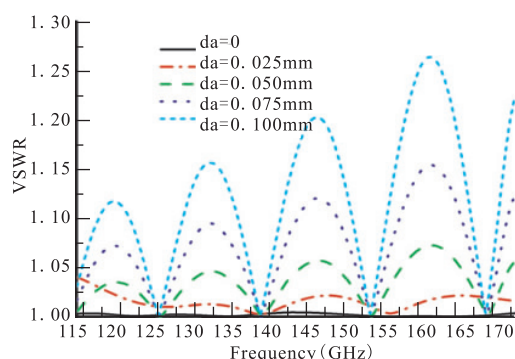


图 3 射频参数仿真模型

Fig.3 Simulation model for radio frequency parameters



(a) 宽边错位对电压驻波比的影响



(b) 窄边错位对电压驻波比的影响

图 4 波导口错位对电压驻波比的影响

Fig.4 Effect of waveguide port dislocation on VSWR

2.2 插入损耗设计

波导开关主要用于多通道微波收发系统,低插损指标有利于提高接收设备动态范围,进而提高设备的灵敏度。在太赫兹波段,目前功率源的最大输出功率相对不足,为了实现更远距离的传输,在减少传输线损耗进而相对提升发射功率的同时,还需要有更高灵敏度的接收设备,这就对波导开关的插入损耗指标提出更高的要求。

影响矩形微波通道插入损耗的主要因素有工作频率、金属壁电导率、通道长度、表面粗糙度等。矩形波导 TE₁₀ 模的工作频率、金属壁电导率与单位长度的衰减量关系可由下式计算^[8]。

$$\alpha = \frac{8.686R_s}{120\pi b} \frac{1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \text{ dB/m} \quad (1)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (2)$$

式中 a 代表波导宽边尺寸, b 代表波导窄边尺寸, λ

为波导波长, ω 为角频率, μ 为磁导率, σ 为电导率。

依据上述公式对 30 mm 长, WR7 ($a=1.651$ mm, $b=0.8255$ mm) 矩形波导的损耗进行了计算, 结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出金属壁电阻对微波通道的衰减影响敏感, 选择银镀层有利于减小开关的插入损耗。

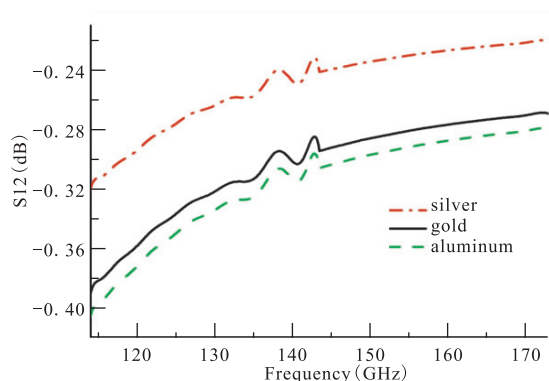


图 5 不同材料对插入损耗的影响

Fig. 5 Effect of different materials on insertion loss

为了准确计算通道表面粗糙度对插入损耗的影响, 利用图 3 中的 HFSS 模型进行分析, 结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 表面粗糙度由 0.8 μm 降到 1.6 μm 时插入损耗明显增加, 之后粗糙度继续增加, 损耗变化不大。因此为降低开关的插入损耗, 微波通道的表面粗糙度应优于 0.8 μm 。

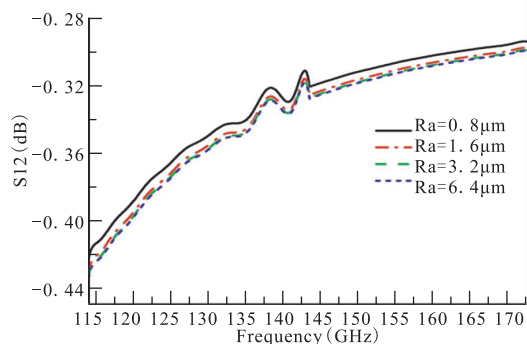


图 6 表面粗糙度对插入损耗的影响

Fig. 6 Effect of surface roughness on insertion loss

在表面粗糙度设置为 0.8 μm 、镀层设置为银的情况下, 对通道长度和插入损耗之间的关系进行了仿真分析, 波导开关最终插损结果如图 7 所示。可以看出, 通道长度是波导开关插入损耗的重要影响因素, 为降低开关的插入损耗必须开展开关的紧凑化、小型化设计, 对于本开关, 微波通道约为 30 mm,

是国外参考产品微波通道长度的 50%。

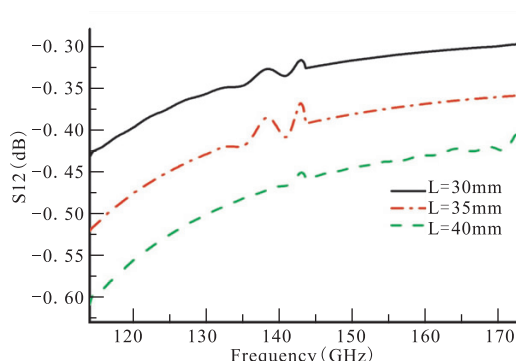


图 7 通道长度对插入损耗的影响

Fig. 7 Effect of channel length on insertion loss

2.3 隔离度设计

隔离度可以看作是非导通端口间的信号传输, 传统方式是在转子上增加扼流槽以提高隔离度指标。但随着频率上升到太赫兹频段, 传统的扼流槽加载方式遇到极大挑战, 竖向扼流槽越发接近波导口, 应力形变导致微波通道变形的风险加大, 以至于无法应用。为了解决传统旋转式波导开关在太赫兹频段, 因扼流槽效率下降导致的隔离度低下问题, 本文采用无间隙波导开关设计方案。无间隙波导开关依靠锥台和锥孔相配合的方式将微波通道断开间隙缩小到“零”, 达到无限高隔离状态。但在真实情况下, 受零件加工精度, 如表面粗糙度、同轴度等的限制, 无法实现“零”间隙配合。用图 3 中模型对微波通道断开间隙为 1 μm 时, 无间隙波导开关的隔离度进行了仿真分析, 结果如图 8 所示, 全频带内隔离度指标为 42 dB, 该结果与文献[5]中给出的实测结果相吻合。故可知, 受当下零件加工精度的影响, 无间隙波导开关的真实隔离度远小于理想状态, 图 9 为泄漏信号图。

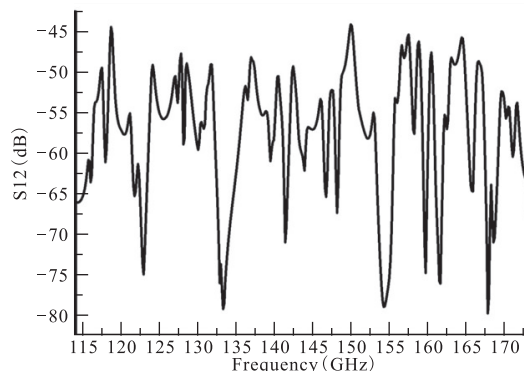


图 8 无间隙波导开关的隔离度

Fig. 8 Isolation of gapless waveguide switch

为进一步提高无间隙波导开关的隔离度,本文提出了一种新型环形扼流槽加载式无间隙波导开关,微波系统如图 10 所示,环形扼流槽加载于微波定子上。仿真结果表明,在相同断开间隙下,加载环形扼流槽后波导开关的隔离度指标有了明显提升,由加载前的 40 dB 提高到了 80 dB。

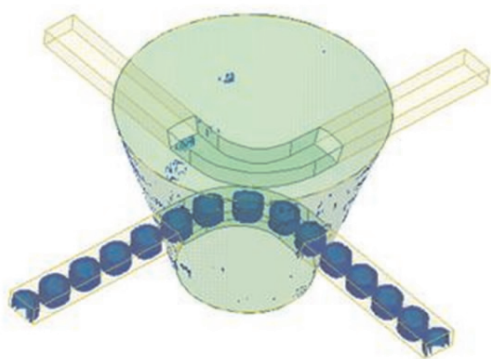


图 9 泄漏信号图

Fig. 9 The leakage signal diagram

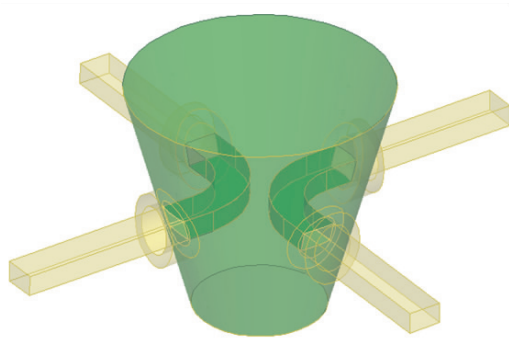


图 10 加载扼流槽后的仿真模型

Fig. 10 Simulation model of loading choke groove

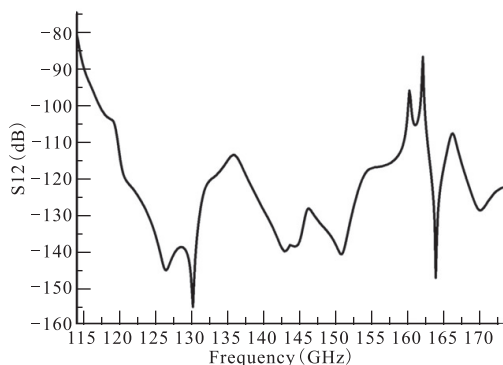


图 11 加载扼流槽后的隔离度

Fig. 11 Isolation of loading choke groove

2.4 耐功率设计

波导开关从组件装配、整件转运、到安装及测试

的各个环节,均易受到多余物的污染。多余物会导致开关功率耐受能力的下降,甚至使开关无法切换。本文设计的波导开关为“直动+旋转式”无摩擦切换,多余物的影响可以忽略。图 13 给出的是在 173 GHz、输入功率为 3000 W 时电场强度的分布情况,最大场强为 2.5×10^6 V/m,小于空气的击穿场强 3×10^6 V/m,证明开关的功率耐受远大于 1 W,满足指标要求。

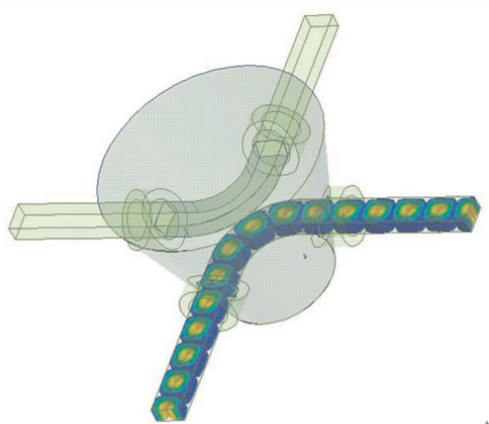


图 12 加载扼流槽后的泄漏信号图

Fig. 12 Leakage signal diagram of loading choke groove

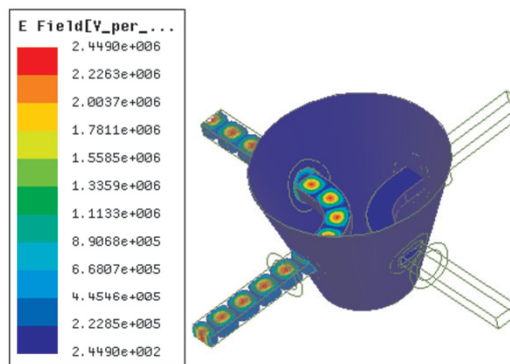


图 13 电场强度分布图

Fig. 13 Distribution map of electric field intensity

3 结论

文章设计了一款工作于 114 GHz ~ 173 GHz 频段的新型太赫兹无间隙波导开关,用 HFSS 软件分析了波导口错位、金属壁电导率、通道长度、表面粗糙度等对波导开关微波性能的影响,并提出一种新型扼流槽加载方式,极大地提高了开关的隔离度指标。仿真结果表明,在 114 GHz ~ 173 GHz 的频率范围内,产品电压驻波比小于 1.1,插入损耗小于 0.45 dB,隔离度大于 80 dB,且耐功率达到 3000 W,满足

指标要求。

参考文献:

- [1] 杨军,姜立伟. 星载微波开关概述 [J]. 空间电子技术, 2017,14(6):39-43.
- [2] 崔宗涛,李志鹏,赵刚. 波导 R 型开关射频转子的设计方法 [J]. 空间电子技术,2018,15(3):22-26.
- [3] JOSEPH H. A two-port WR75 waveguide turnstile gyro-magnetic switch [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2010,58(6):1485-1492.
- [4] 汪择宏,王书见,牛之友. W 波段机电波导开关的设计 [J]. 机电元件,2018,3(5):57-61.
- [5] Chuxian Z. Terahertz gapless low insert loss switch technology [C]. Proceedings of the 48th European Microwave Conference, Madrid,2018:408-411.
- [6] 于倩. Ka 多通道波导开关的微波性能设计及验证 [J]. 现代雷达,2016,38(10):65-68.
- [7] 王书见,王克廷. 小型化 Ku 波段机电波导开关的设计 [J]. 微波学报,2016,19(5):313-316.
- [8] 梁昌宏. 简明微波[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2015.

著作权使用说明

本刊为万方数据电子出版社入选期刊,同时已被 CNKI 中国期刊数据库等其他数据库全文收录;其作者文章著作权使用费与本刊印刷版稿酬一次支付。

为适应我国信息化建设需要,扩大本刊及作者知识信息与学术交流渠道,本刊已与相关期刊数据库合作,尤其以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊所发表文章如作者没有特殊说明,将视为同意发表在数据库中。若作者不同意文章被数据库收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将作适当处理。

本刊编辑部