

以黑体辐射与天线噪声温度为例的物理学与专业课程衔接研究

李智强 张介秋 王伟宇 李磊 闫明宝 范琦

(中国人民解放军空军工程大学基础部, 陕西 西安 710051)

摘要 本文研究探讨了大学物理课程与无线电通信相关专业课程之间的衔接问题。首先,梳理了热噪声研究的历史脉络,明确了噪声温度概念的起源,并给出了噪声温度的一般性定义。其次,以天线作为电磁波换能器为切入点,结合黑体辐射理论与基尔霍夫热辐射定律,推导了天线热噪声功率谱密度的定量表达式。在揭示天线热噪声物理机制的基础上,阐述了天线噪声温度概念的构建逻辑与物理内涵。教学实践表明,将上述思路融入教学,加深了学生对相关物理知识的理解。本研究旨在深化学生对大学物理课程中黑体辐射理论的理解,同时为无线电通信专业课程的教学提供参考,通过将基础物理理论延伸至无线电通信领域,体现了基础物理课程在课程体系中的桥梁作用,有助于培养学生的跨学科综合素养与创新性思维能力。

关键词 课程衔接;黑体辐射;天线热噪声;噪声温度;功率谱密度

A STUDY ON THE CONNECTION BETWEEN UNIVERSITY PHYSICS AND PROFESSIONAL COURSES: TAKING BLACKBODY RADIATION AND ANTENNA NOISE TEMPERATURE AS AN EXAMPLE

LI Zhiqiang ZHANG Jieqiu WANG Weiyu LI Lei YAN Mingbao FAN Qi

(Fundamentals Department, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051)

Abstract This paper investigates the connection between college physics courses and professional courses related to radio communication. First, it reviews the historical development of thermal noise research, clarifies the origin of the concept of noise temperature, and provides a general definition of noise temperature. Next, taking the antenna as an electromagnetic wave transducer, it derives the quantitative expression for the antenna thermal noise power spectral density by combining the theory of blackbody radiation with Kirchhoff's law of thermal radiation. Based on revealing the physical mechanism of antenna thermal noise, the paper elaborates on the logical construction and physical connotations of the concept of antenna noise temperature. Teaching practice has shown that integrating the above ideas into teaching deepens students' understanding of the relevant physical knowledge. This study aims to deepen students' understanding of the blackbody radiation theory in college physics courses and pro-

收稿日期: 2024-09-12

通信作者: 范琦, af-fanqi@126.com。

引文格式: 李智强, 张介秋, 王伟宇, 等. 以黑体辐射与天线噪声温度为例的物理学与专业课程衔接研究[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 35-40.

Cite this article: LI Z Q, ZHANG J Q, WANG W Y, et al. A study on the connection between university physics and professional courses: Taking blackbody radiation and antenna noise temperature as an example[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 35-40. (in Chinese)

vide a reference for the teaching of radio communication professional courses. By extending the basic physical theory to the field of radio communication, it demonstrates the bridging role of basic physics courses in the curriculum system, which is conducive to cultivating students' interdisciplinary comprehensive literacy and innovative thinking abilities.

Key words course connection; blackbody radiation; antenna thermal noise; noise temperature; power spectral density

在高等教育体系中,大学物理课程作为理工科学生的基础必修课,不仅构成了学生基础知识体系的核心部分,还深刻影响着学生的科学素养与后续专业课程的深入学习。该课程涵盖力学、电磁学、光学、热学和近代物理等多个领域,为学生提供了丰富的物理学知识与理论支撑,同时也培养了学生科学思维和研究方法。

鉴于大学物理在工科教育中的重要地位,如何有效衔接大学物理与专业课程,以满足专业建设的需求,已成为教学改革的主要议题之一。近年来,众多高校教师在教学设计、教材创新、MOOC 资源建设等多个方面进行了积极的探索与实践,取得了显著的成果。例如,张诗按^[1]等学者以机械设计、机械电子、材料科学和通信工程等专业为例,探讨了具有专业特色的大学物理慕课改革,旨在通过课程内容的优化,使学生能够更好地将物理知识应用于专业实践中。李东^[2]等则针对国防生的培养目标,探索了创新人才的新培养模式,强调了物理知识与国防科技的紧密联系。李春燕^[3]则探讨了军事应用案例在物理教学中的融入,旨在提高学生的实践能力和创新意识。满玉红^[4]则从材料类专业的人才培养特点出发,深入探讨了大学物理课程的教学改革问题。

值得注意的是,根据一项调查研究^[4],高达 97% 的学生期望在大学物理的课堂教学中,能够适当介绍与本专业相关的概念。这种需求反映了学生对于物理知识与专业知识结合的渴望,同时也为大学物理教学改革指明了方向。因此,通过具体的实例,将大学物理课堂教学内容与专业课中的重要知识或概念建立联系,不仅有助于加深学生对相关物理知识的理解,提高学生的学习兴趣,还能拓展其知识,并与后续专业课建立联系,实现大学物理课程的“接口”作用,使学生更加深入地认识到大学物理课程在课程体系中的重要地位。

结合教学实践,笔者发现“以大学物理中黑体辐射为接口讨论天线的噪声温度”是一个有意义的实例。“黑体辐射”是大学物理的重要内容,同时,“噪声温度”是信息通信领域的一个基本概念,在雷达工程、电子信息工程与通信工程等专业方向中更是噪声分析与表征的基本参量,具有重要的教学价值和工程应用价值。以作者所在高校的“雷达工程”专业为例,在专业基础必修课《雷达原理》中,“噪声温度”是教学计划规定的第三章的重点教学内容。该课程教材^[5]中采用直接定义“天线噪声功率谱密度”是“环境热力学温度 T ”的线性函数,从而引入“噪声温度”这一概念。在“电子信息工程”、“通信工程”和“导航工程”的专业课教材^[6,7]中,建立“噪声温度”这一概念的过程是类似的。然而,这些教材均未解释为何可以用热力学温度来表征噪声功率密度。根据对授课教师的访谈,专业课教师坦言自己并不清楚“噪声温度”概念的物理起源及其对应的物理图像,因此教学中通常不会展开相关解释。即使是天线领域的权威著作^[8],也仅提到噪声功率密度与热力学温度的正比关系来自于 Johnson-Nyquist 关系,也没有深入探讨其物理原理,导致读者对“天线噪声温度”的物理图像不完整,因此,在大学物理课程中增加此部分内容,有重要的作用。

本文结合天线的基本原理,从普朗克黑体辐射公式出发,说明了天线噪声温度的物理内涵,并推导天线热噪声功率谱密度的定量表达式,解释了天线热噪声的成因。

这一尝试使得大学物理教学内容与专业课程的重要概念之间建立了直接的联系,同时体现了物理理论与工程实践的结合,也为上述专业的大学物理教学实践提供了新的思路与参考。

1 热噪声与噪声温度溯源

热噪声的研究最早见于 20 世纪初,1925 年荷

兰物理学家威廉·埃因托芬^[9]发现,在接近真空的磁场中没有接入任何电源的绷紧的细导体弦,始终存在一种极其规律的振动。威廉认为导体中电子的热运动激发了一种电流——“布朗电流”,磁场对“布朗电流”的作用表现为实验中观察到的弦线的振动。

1927年 Johnson^[10]在研究真空管的噪声时,首次发现连接在真空管上的导体会产生一种自发的噪声,这种噪声的功率只与导体的热力学温度成正比,与导体本身的组成无关。Johnson认为产生这种噪声的原因是导体中电子的热运动,并将他的发现视为对威廉“布朗电流”的进一步的解释,并称之为“热噪声”。

1928年, Nyquist^[11]假设 Johnson 发现的热噪声的本质是闭合回路上的“电压波”(voltage-wave),运用热力学与统计物理的相关理论计算了热噪声功率谱密度 p_v 。

$$p_v = kT \quad (1)$$

其中, k 为玻耳兹曼常数, T 是导体的热力学温度, p_v 是导体产生的噪声功率谱密度,单位 $\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

式(1)又被称为 Johnson-Nyquist 关系,式中的噪声功率谱密度与频率无关,只依赖于导体的热力学温度。因此,用热力学温度 T 作为单一变量描述导体上的热噪声的功率谱密度极为方便,这就是“噪声温度”这一概念最初的来源,一般记作 T_A 。

2 天线的热噪声与噪声温度

天线是电磁波传输的关键部件,若按天线的工作性质可分为发射天线和接收天线两大类,但从其物理实质看,只是电磁波的“出口”与“入口”,并没有实质上的区别。因此,以下讨论与天线的工作性质无关,并只使用“天线”一词。天线的接收质量是衡量其性能的重要指标,而天线的噪声是影响天线接收质量的重要因素。

天线的噪声来源可大致分为两类:外部噪声和内部噪声。内部噪声主要源于天线自身结构中的各类损耗所产生的噪声;而外部噪声则包含多种成分,如其他无线电设备或电器设备的工业辐射,以及来自地面、大气、太阳、银河系以及银河外星系的热辐射等。在多数情况下,工业辐射可以通过技术手段进行控制,甚至抑制或消除,但太空

乃至周围环境的热辐射所产生的噪声则难以避免,这一部分噪声一般称为(天线的)热噪声^[12,13]。

在天线领域,也使用噪声温度描述天线的噪声功率谱密度。一般文献^[12,13]通常采用简单类比导体热噪声的方法,直接给出天线的噪声功率谱密度符合 Johnson-Nyquist 关系的结论,并将式(1)中的温度定义为描述天线热噪声的功率谱密度的噪声温度,并未深入解释噪声温度 T_A 的定义。天线领域的权威文献^[8]给出了如下的天线热噪声温度的说明。

图 1(a)的终端是一个温度为 T_R 阻值为 R 的电阻,图 1(b)的终端为放置于温度为 T_c 的消波室中的一架辐射电阻为 R 的无耗电天线,图 1(c)为一架指向温度为 T_s 的天空的天线(与图 1(b)中的天线完全相同),那么,若三种情况下的温度有如此关系 $T_R = T_c = T_s$,则三个馈端上的单位频带噪声功率均相同,热噪声的功率谱密度可由式(1)给出,相应的记天线的噪声温度为 T_A ,并等于天空温度 T_s ^[8]。

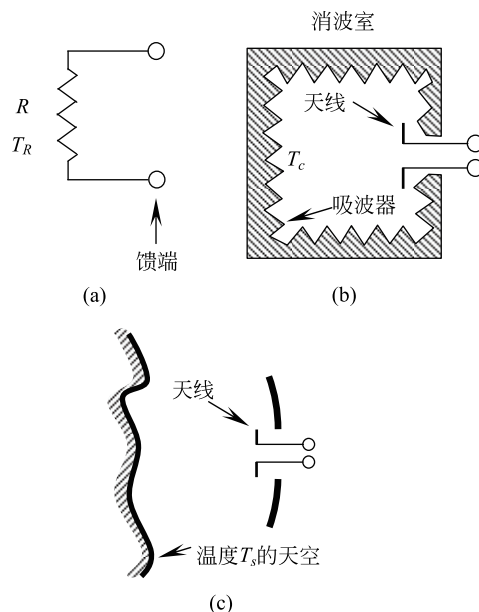


图 1 接收天线的噪声温度^[8]

(a)电阻的温度 T_R ; (b)消波室中的温度 T_c ; (c)天线观察天空的温度 T_s 。

可以看出,这种定义是以某一温度下的电阻(导体)自身所产生的(热噪声)电压为参照来定义天线热噪声温度的,并不是天线本身的物理温度。而且,从物理实质上来看,这种定义对天线热噪声的本质并没有足够的说明,同时,对于 Johnson-

Nyquist 关系可以用于计算天线热噪声功率谱密度的原因也未见解释。

3 天线热噪声的物理实质分析与定量计算

根据天线热噪声的定义,以及天线的物理实质即电磁波换能器,可以将天线热噪声的产生机理表述为:置于环境中的一架天线,馈端产生热噪声的实质是天线接收了环境中物体的分子、原子受到热激发而发射的电磁波——热辐射^[12]。

图 1(c)中的温度为 T_s 的天空的热辐射场总是可以视作平衡热辐射场。根据基尔霍夫热辐射定律,平衡热辐射与黑体辐射具有等价性,这两种等价热辐射的谱密度是与方向无关的,是各向同性的^[14]。因此,图 1(c)中的天线的热噪声的功率谱密度,就等于将该天线置于热力学温度为 T_s 的黑体热辐射场中时,所能接收到的单位频率的热辐射功率 p_ν 。

黑体辐射场的能量分布可以由黑体辐射理论得出。普朗克在 1900 年给出了黑体辐射公式^[15]

$$M_B(T, \nu) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (2)$$

其中, $M_B(T, \nu)$ 描述的是黑体表面的单色辐出度,即单位面积上单位频率间隔的辐射功率,也可称为辐射功率谱密度,单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。由平衡热辐射与黑体辐射的等价性可知,上式也是描述黑体辐射场中穿过任意截面上的功率谱密度。

由文献^[16]可知,在各向同性、均匀且恒定的辐射场中,辐射功率谱密度 $M(\nu)$ 与单位体积的辐射能的谱密度(简称能量谱密度) $u(\nu)$,有如下关系

$$u(\nu) = \frac{4}{c} M(\nu)$$

因此,在温度为 T 的黑体的辐射场中,能量谱密度 $u_B(T, \nu)$ 与黑体辐射功率谱密度有如下关系

$$u_B(T, \nu) = \frac{4}{c} M_B(T, \nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (3)$$

这些能量的传播是各向同性的,单位立体角内的能量密度可表示为

$$\frac{du_B(T, \nu)}{d\Omega} = \frac{u_B(T, \nu)}{4\pi} = \frac{2h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (4)$$

这些电磁能量总是可以等效为两个极化方向互相垂直的电磁波的能量,而且每个极化方向的能量是总能量的 1/2。这些电磁波可以近似认为是定向的,任意方向的能流密度均相同,且等于单

位立体角的单色能量密度乘以光速 c 。因此,上述等效的相互垂直极化方向中,任一极化方向频率 ν 附近单位频率的能流密度 S 可表示为

$$S = \frac{h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (5)$$

由天线理论可知,对于任何置于此辐射场中的天线,总是可以被视为一个有特定面积 A_e (称为天线的等效面积,通常情况下即为天线的面积)的平面,天线只能接收沿特定方向传输、与天线极化相同且落在天线主波束范围内的辐射功率,任一天线主波束的立体角宽度 Ω 、波长 λ 及等效面积 A_e 总有如下关系^[8]

$$\Omega = \lambda^2 / A_e \quad (6)$$

根据天线理论^[8],辐射到天线、与天线极化相同且落入天线主波束内的单位频率间隔的热辐射功率谱密度 p_ν 等于能流密度 S 、天线面积 A_e 和波束立体角宽度 Ω 三个量的乘积

$$p_\nu = S \Omega A_e = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (7)$$

上式描述的是置于热力学温度为 T 的平衡热辐射场中指向任意方向的任意天线接收到的噪声的功率谱密度,其数值只与热力学温度 T 、频率 ν 有关。

4 结果讨论与验证

式(7)给出了天线接收的平衡热辐射场中的热辐射的功率谱密度,其数值依赖于与平衡热辐射场等效的黑体辐射的热力学温度和天线的工作频段,与具体的天线的基本参数无关。

以微波天线为例,总有 $h\nu/kT \ll 1$ (例 $T = 300\text{K}$, $\nu = 100\text{GHz}$ 时, $h\nu/kT \approx 0.016$), 因此式(7)中 $e^{h\nu/kT} - 1 \approx h\nu/kT$, 即瑞利-金斯近似,则式(7)可近似为

$$p_\nu = kT \quad (8)$$

式(8)说明,对于置于平衡热辐射场中的微波频段的的天线,其接收到单位频率的热噪声功率谱密度等于波耳兹曼常数 k 与平衡热辐射场对应的黑体辐射热力学温度 T 的乘积,正是前文所述式(1)的 Johnson-Nyquist 关系。

当天线指向一些特定方向,热辐射的伸展大于天线波束时,由 Johnson-Nyquist 关系可以直接从热辐射源的热力学温度得出天线热噪声的功率谱密度,其数值与天线的频率无关。实际中,天线所指向的区域的等效的黑体辐射温度多数保持不

变或者有规律的变化,而噪声功率是功率谱密度与带宽的乘积。天线的通带一般是设计时给定的参数,不会随着天线的指向而改变,而天线波束范围的热辐射源的热力学温度一般是已知的或者按照确定的规律变化,所以,在天线领域乃至微波或红外领域,使用的噪声温度这一概念反映系统的热噪声功率极为便捷。进而,凡是类似的功率谱密度与频率无关的噪声(也称白噪声),多数采用了相似的“等效噪声温度”的概念予以描述。

上述分析与计算直观的说明了天线的热噪声本质上就是环境中的热辐射被天线接收而产生的,也解释了噪声温度这一概念的物理实质和来历。

验证上述思路最典型的实例就是当天线主波束垂直地面指向太空时,其噪声温度应该是太空的温度——宇宙大爆炸原始火球的残余温度,即宇宙背景辐射,其对应的黑体辐射温度近似等于3K,简称3K背景辐射。1964年,彭齐亚斯和同在贝尔电话公司工作的威尔逊使用一架为早期通信卫星设计的天线,接收到了来自天空的均匀、且不随时间变化的信号,尽管采用了各种措施尽量消除各种估计到的噪音来源(比如大气的热辐射),但这个多余的等效温度值约3.5K的噪声依然存在。1965年,他们二人在《天体物理学报》上发表了论文《在4080MHz上额外天线温度的测量》^[17],宣布了这个发现。同时,普林斯顿大学的狄克等人^[18]在同一杂志上将上述辐射解释为宇宙大爆炸留下来的宇宙微波背景辐射。这一发现为宇宙大爆炸理论提供了得力证据,彭齐亚斯和威尔逊因此获得1978年诺贝尔物理学奖,也从无线电工程师转变为射电天文学家。

当天线的主波束范围内有多个不同温度的热源,则可以由其对应的立体角进行加权计算,得到天线的等效噪声温度。天线波束方向与地面平行

或有一定角度时就属于这一情形,具体计算方法不做讨论。

从本文的计算中可以发现,噪声功率谱密度与频率无关是在频率不太高(或者主波束范围内热源的温不是极低)时的近似结论。例如,若天线的工作频带在太赫兹频段, $e^{h\nu/kT} - 1 \approx h\nu/kT$ 近似将不成立,天线的噪声功率谱密度需用式(7)计算,其数值并不是热力学温度的单值函数,也就不能使用单一的噪声温度的概念反映噪声功率谱密度了。

5 教学实践效果

笔者连续在2022—2024年的三个秋季学期“大学物理”课程“黑体辐射”一节的教学,尝试将天线噪声温度的理论溯源作为课程衔接案例进行了教学实践。通过在课堂中简要阐释黑体辐射理论与天线噪声模型的关联性,并截取文献[6-13]推荐给学生,引导学生在掌握基础理论的同时理解噪声温度的物理内涵。

对2021级、2022级和2023级累计75人次的课后访谈显示:88%的学生深化了对基尔霍夫热辐射定律和黑体辐射理论的理解,相关数据见表1;同时发现,近半数学习者主动开展了延伸阅读。在后续开设的“天线与电波传播”课程中,2021—2022级学生中有近60%能够从热辐射理论角度定性解释“天线噪声温度”的物理内涵,该表现获得专业课教师的教学反馈认可。

6 结语

本文以“热噪声是天线接收到的环境中的热辐射”为基本观点,将环境中的热辐射视作可由黑体辐射公式描述的平衡热辐射,并以普朗克黑体

表1 教学效果调查数据(部分)

	深化了基尔霍夫热辐射定律的理解					深化了黑体辐射定律的理解					
	完全同意	比较同意	中立	比较不同意	完全不同意	完全同意	比较同意	中立	比较不同意	完全不同意	
2021级	17	7	1	0	0	10	8	6	1	0	
2022级	16	8	1	0	0	11	11	2	1	0	
2023级	15	8	2	0	0	11	10	2	2	0	
平均占比	64.0%	30.7%	5.3%	0.0%	0.0%	42.7%	38.7%	13.3%	5.3%	0.0%	
平均认可教学效果人数的占比	88%										

辐射公式为出发点,结合天线理论推导出天线的热噪声功率谱密度的定量表达式,该表达式呈现出与具体的天线参数无关的特点。在微波波段热噪声的功率谱密度表现出与频率近似无关的特性,其数值大小仅取决于天线波束范围内的热辐射源的热力学温度。本文的这一观点一方面有效地阐明了天线噪声温度的物理本质和起源,另一方面为大学物理中的黑体辐射教学内容寻找到了后继专业课程的接口。

在教学实践中,适当地引入本文的研究思路,不仅有助于拓宽学生的知识视野,加深对相关物理概念的理解,还能有效提高学生的学习兴趣。此外,将基础课程与后续专业课程相衔接,为教师提供了一种有益的教学研究与探索,也有助于培养学生的综合能力和创新思维。

参 考 文 献

- [1] 张诗按. 建设具有专业特色的大学物理慕课教学改革研究[J]. 教育教学论坛, 2021, (23): 49-52.
ZHANG S A. Study on the MOOC teaching reform of college physics with professional features[J]. Education and Teaching Forum, 2021, (23): 49-52. (in Chinese)
- [2] 李东, 段利兵, 白晓军, 等. 国防特色高校大类培养背景下“课堂+网络+科创”三位一体大学物理教学模式实践[J]. 大学物理, 2024(43): 43-48.
LI D, DUAN L B, BAI X J, et al. Practice of classroom+network+science and technology innovation trinity teaching model of college physics under the background of large category training in national defense features university[J]. College Physics, 2024(43): 43-48. (in Chinese)
- [3] 李春燕, 余同普, 彭小涓. 大学物理中军事案例教学的设计与探索——以枪炮后坐力为例[J]. 物理与工程, 2023, (5): 23-27.
LI C Y, YU T P, PENG X H. Design and exploration of military case teaching in college physics—Taking the recoil of guns and cannons as an example[J]. Physics and Engineering, 2023, (5): 23-27. (in Chinese)
- [4] 满玉红, 程南璞, 覃礼钊. 基于材料类专业的大学物理课程的教学改革探索[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014, 39(5): 193-195.
MAN Y H, CHENG N P, QIN L Z. Exploration on the teaching reform of college physics course based on materials-related majors[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2014, 39(5): 193-195. (in Chinese)
- [5] 张欣, 叶灵伟, 李淑华等. 航空雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 78-79.
ZHANG X, YE L W, LI S H, et al. Principles of airborne radar[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012: 78-79. (in Chinese)
- [6] 刘学观, 郭辉萍. 微波技术与天线[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 142.
LIU X G, GUO H P. Microwave technology and antennas[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2006: 142. (in Chinese)
- [7] 李莉. 天线与电波传播[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 51-55.
LI L. Antenna and radio wave propagation[M]. Beijing: Science Press, 2009: 51-55. (in Chinese)
- [8] 约翰克劳斯, 马赫夫克. 天线[M]. 3版. 章文勋, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011: 320, 22.
KRAUS J D, MARHEFKA R J. Antennas: For all applications[M]. 3rd ed. Translated by ZHANG W X. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 320, 22. (in Chinese)
- [9] 埃因托芬 W, 埃因托芬 W F, 范德霍斯特 W, 等. 张紧的弦的布朗运动[J]. Physica, 1925, 5: 358-360.
EINTHOVEN W, EINTHOVEN W F, VAN DER HORST W, et al. Brownsche Bewegingen Van Een Gespannen Snaar[J]. Physica, 1925, 5: 358-360. (in Chinese)
- [10] JOHNSON J B. Thermal agitation of electricity in conductors[J]. Nature, 1927, January 8: 50-51.
- [11] NYQUIST H. Thermal agitation of electric charge in conductors[J]. Physical Review, 1928, 32: 110-113.
- [12] 聂在平. 天线工程手册[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2014: 1-2, 17-19.
NIE Z P. Antenna engineering handbook[M]. Chengdu: Chengdu University of Electronic Science and Technology Press Co., Ltd., 2014: 1-2, 17-19. (in Chinese)
- [13] 周希朗. 微波技术与天线[M]. 南京: 东南大学出版社, 2015: 11-12, 479-481.
ZHOU X L. Microwave technology and antennas[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2015: 11-12, 479-481. (in Chinese)
- [14] 曹则贤. 黑体辐射公式的多种推导及其在近代物理构建中的意义(I)[J]. 物理, 2021, 50(11): 761-766.
CAO Z X. Multiple derivations of the blackbody radiation formula and its significance in the construction of modern physics (I)[J]. Physics, 2021, 50(11): 761-766. (in Chinese)
- [15] 东南大学等七所工科院校. 物理学: 下册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020: 324-334.
Seven Engineering Colleges including Southeast University. Physics: Volume II[M]. Beijing: Higher Education Press, 2020: 324-334. (in Chinese)
- [16] 赵凯华, 罗蔚茵. 量子物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 11-13.
ZHAO K H, LUO W Y. Quantum physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 11-13. (in Chinese)
- [17] PENZIAS A A, WILSON R W. A Measurement of excess antenna temperature at 4080Mc/s[J]. The Astrophysical Journal, 1965, 142: 419-421.
- [18] DICKE R, et al. Cosmic black-body radiation[J]. The Astrophysical Journal, 1965: 414-419.